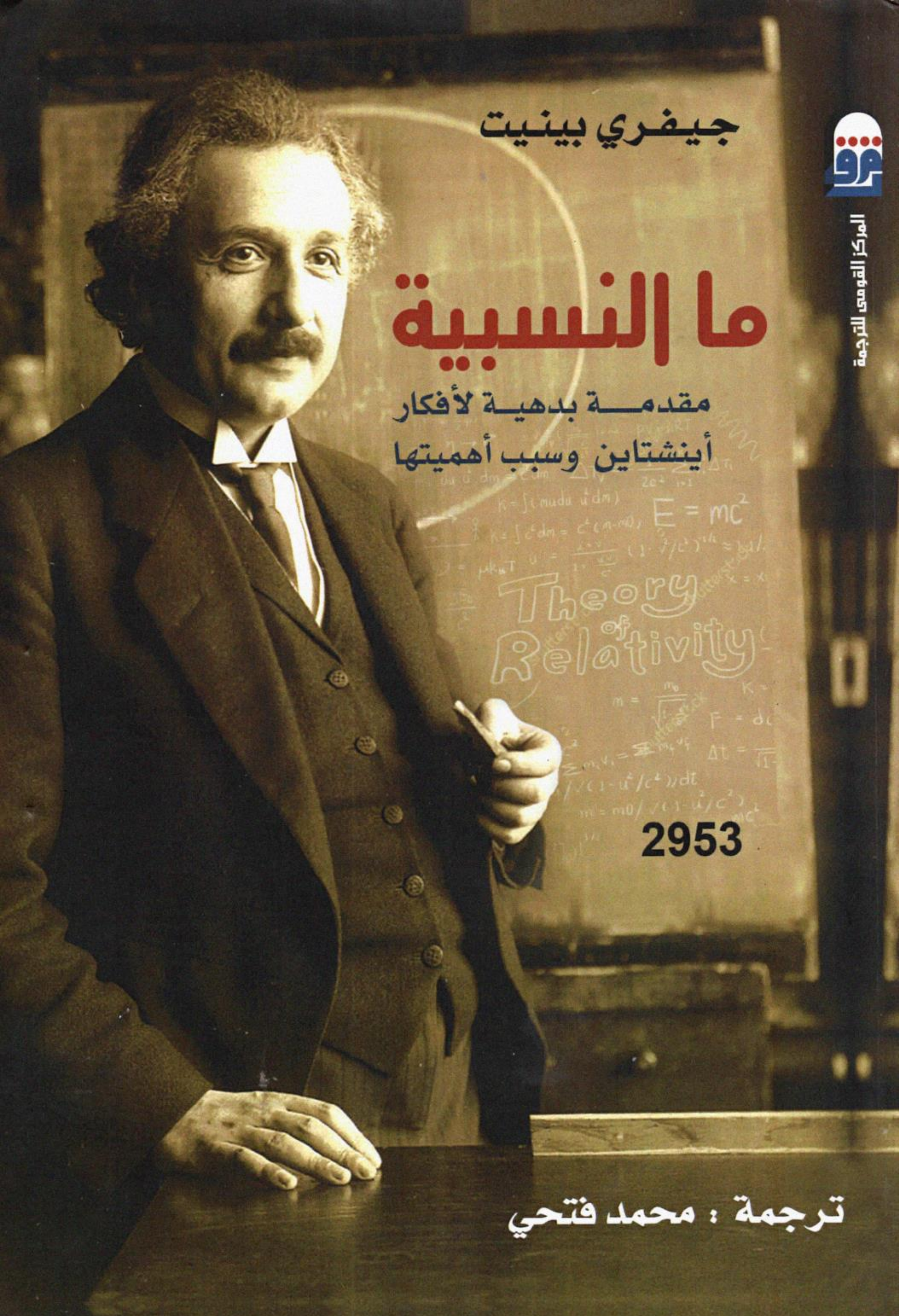


جيفري بينيت

ما النسبية

مقدمة بدهية لأفكار أينشتاين وسبب أهميتها

2953

ترجمة : محمد فتحي

المركز القومي للترجمة

ما النسبية؟

مقدمة بدهية

لأفكار أينشتاين وسبب أهميتها

المركز القومى للترجمة

تأسس فى أكتوبر ٢٠٠٦ تحت إشراف: جابر عصفور

مدير المركز: أنور مغيث

- العدد: 2953
- ما النسبية؟ مقدمة بدهية لأفكار أينشتاين وسبب أهميتها
- جيفرى بينيت
- محمد فتحى
- الطبعة الأولى 2017

هذه ترجمة كتاب:

WHAT IS RELATIVITY?

An Intuitive Introduction to Einstein's Ideas, and Why They Matter

By: Jeffrey Bennett

شارع الجبلاية بالأوبرا- الجزيرة- القاهرة. ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤

El Gabalaya St. Opera House, El Gezira, Cairo.

E-mail: nctegypt@nctegypt.org Tel: 27354524 Fax: 27354554

ما النسبية؟

مقدمة بدهية

لأفكار أينشتاين وسبب أهميتها

تأليف: جيفري بينيت

ترجمة: محمد فتحي

2017

بطاقة الفهرسة
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية
إدارة الشئون الفنية

بينيت، جيفرى
ما النسبية؟ مقدمة بدهية لأفكار اينشتاين وسبب أهميتها / تأليف : جيفرى بينيت ترجمة : محمد فتحى .
القاهرة، المركز القومي للترجمة، ٢٠١٧
٢٤٨ ص، ٢٤سم
١- ما النسبية؟ (نظرية)
(أ) فتحى ، محمد (مترجم)
(ب) العنوان ٥٣٠,١١

رقم الإيداع : ١٣٥٥٠ / ٢٠١٦
الترقيم الدولى : 978-977-92-0712-4
طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

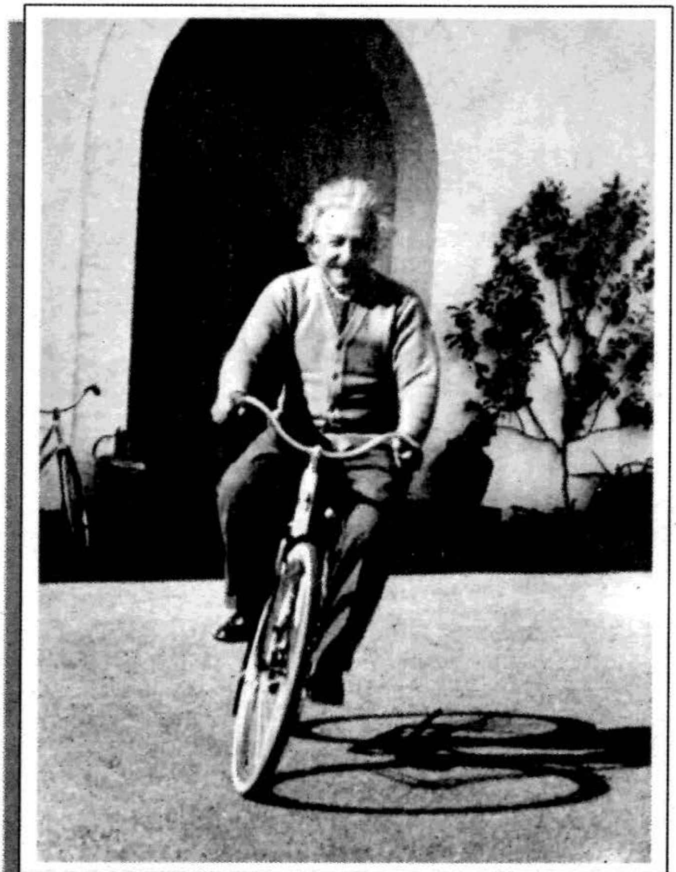
المحتويات

شكر

لم أكن لأستطيع كتابة هذا الكتاب دون مساهمات للعديد من الأشخاص الآخرين وأود أن أشكر بشكل خاص مارك فويت وميجان دوناهو، المؤلفين المشاركين معي (جنبًا إلى جنب مع نيك شنايدر) في الكتاب المرجعي لعلم الفلك، **المنظور الكوني**. مارك وميجان يعرفان في الواقع أكثر مني بكثير حول النسبية، ساعدني كلاهما في كتابة الفصول عن النسبية في كتابنا المرجعي، والعديد من الأمثلة والتشبيهات المعروضة في هذا الكتاب هي أمثلة وتشبيهات ألفناها أصلاً لهذا الكتاب. وبالإضافة إلى ذلك، تلقيت مساعدة هائلة من مارك فويت ومن الأستاذ أندرو هاميلتون من جامعة كولورادو، اللذين قرأ كلاهما كل هذه المخطوطة بعناية، وقدما لي اقتراحات حول كيفية أن أحافظ على مستوى يناسب الجمهور العادي مع الحفاظ على الدقة العلمية. وتلقيت أيضًا اقتراحات ممتازة عديدة لزيادة الإيضاح من اثنين من القراء غير العلميين المهتمين: صديقي الطبيب جوان مارش وابني بالمدرسة العليا، جرانت بينّيت. إن العديد من الآخرين من بينهم أساتذتي وزملائي قد كانوا مهمين جدًا في تشكيل فهمي للنسبية. وأود أن أعترف بالفضل خاصة لـ تي. إم. هيليويل، الذي درست على يديه النسبية في فصلي الدراسي الأول في كلية هارفي مدّ، ومن الأساتذة في جامعة كولورادو: أندرو هاميلتون، وجيه. ومايكل شال، وريتشارد مكراي، وتيوتور بي، سنو وجيه، مكيم مالفيل، وأود أن أعترف أيضًا بفضل كتب عديدة كانت مهمة خصوصًا لأنها ساعدتني في فهم محتوى النسبية وفي منحي أفكارًا حول طريقة تدريسها للجمهور؛ وفي الواقع، فإن العديد من التجارب الذهنية والأمثلة التي قد قدمتها في هذا الكتاب لها أصولها في أمثلة صادفتها للمرة الأولى في هذه الكتب الأخرى، والتي تتضمن:

Einstein's own book for the general public, simply titled Relativity; The Relativity Explosion, by Martin Gardner; Spacetime Physics, by Edwin Taylor and John Archibald Wheeler; The Physical Universe, by Frank Shu; Gravity and Spacetime, by John Archibald Wheeler; Gravity's Fatal Attraction, by Mitchell Begelman and Martin Rees; Black Holes and Time Warps, by Kip S. Thorne; Cosmos, by Carl Sagan; and Einstein: His Life and Universe, by Walter Isaacson.

وشكري الخاص للجميع في مطبعة جامعة كولومبيا، خصوصًا فريق التحرير باتريك فيتزجيرالد وبريدجيت فلانيري ماكوي، لوضع ثقتهم في هذا المشروع وتحويل مخطوطتي إلى كتاب منشور. وأشكر أيضًا نانسي ويلتون وآخرين في بيرسون أديسون– ويسلي على السماح لي بكتابة هذا الكتاب بكل هذه الكمية الكبيرة من المواد، بما في ذلك الرسوم التوضيحية المأخوذة من كتابنا المرجعي **المنظور الكوني**. وفي النهاية أشكر زوجتي، ليزا وولدي جرانت وبروك لدعمهم المستمر، وإلهامهم ونفاذ بصيرتهم.



احتفالا بالذكرى المئوية لنشر أينشتاين النظرية النسبية العامة في عام ١٩١٥.

(بتصريح من أرشيفات معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا).

مقدمة

جاء لقائي الحقيقي **الأول** مع نظرية أينشتاين عن النسبية في دورة أخذتها خلال السنة التمهيدية في الكلية. كنت قد سمعت دائمًا مثل أي شخص آخر، ذلك الاعتقاد بأن النسبية صعبة بلا ريب. ولكنني سرعان ما أدركت، عندما استمعت إلى أستاذي وراجعت دروسي بالمنزل، أنها لا تستحق هذا الوصف. فالنسبية لا تجعل الأمور أكثر صعوبة، بل إنها تجعل كل شيء يبدو بسيطًا، عندما تتمكن فقط من فهمها. ويبدو من المهم أيضًا أنني قد أدركت فجأة، أنه قبل دراسة النسبية، لم أستطع فهم الطبيعة الأساسية للمكان والزمان. ومع الوضع في الاعتبار، بأننا نعيش حياتنا بأكملها على كوكب في المكان ونتحرك خلال الزمان، فقد بدا هذا بمثابة فجوة حقيقية فيما تعلمته مبكرًا.

وفي غضون سنة كنت أُدرِّس بعض الأفكار عن النسبية لأطفال المدارس الابتدائية والمتوسطة، كجزء من دراسة صيفية نظمتها للأطفال المهتمين بالفضاء والعلوم. ولقد دهشت من مدى سهولة فهم العديد منهم للأفكار الرئيسية، وساعدتني سهولة تقبلهم للمفاهيم على إدراك حقيقة أساسية: أن الكثير من الصعوبة التي لدى معظم الناس حول نظرية النسبية تتأتى فقط من أنها تتعارض مع الأفكار حول المكان والزمان التي أصبحت لها جذور عميقة في عقولنا. وبالنسبة للأطفال، الذين تتأصل لديهم هذه الأفكار بعمق أقل، فإن النسبية لم تبدُ غريبة تمامًا، مما سمح لهم بسهولة تقبلها أكثر من البالغين.

وقد أثبتت هذه الرؤية أنها مفيدة بشكل خاص بعد سنوات قليلة، عندما بدأت التدريس على مستوى الكلية، وأدخلت النسبية كجزء لا يتجزأ من محاضراتي في

مقدمة علم الفلك. وركزت، بناء على سابقة عملي مع الأطفال الأصغر سنًا، على مساعدة الطلاب في التغلب على مقاومتهم الطبيعية عند تصحيح أفكارهم عن المكان والزمان. والميزة الإضافية لهذا النهج هي إمكانية القيام به دون الاستعانة بمعظم الرياضيات التي تصاحب النسبية، مما سمح للطلاب بالتركيز على بناء تصور مفاهيمي. وعامًا بعد آخر، وأثناء تقييمات نهاية كل دورة دراسية، حازت النسبية بثبات على أفضل مرتبة عندما سألت الطلاب عن الجزء المفضل لديهم في المقرر. وعندما سألتهم عن السبب أجابوا بأنهم استمتعوا بالنسبية كثيرًا، وكانت أكثر الأسباب شيوعًا: (١) تقديرهم للدور الذي فتحت به النسبية عقولهم بطرق جديدة وغير متوقعة؛ و(٢) أنهم افترضوا دائمًا بأن النسبية موضوع من شأنه أن يستعصي على فهمهم، ولذا فقد أثارهم اكتشاف أن باستطاعتهم واقعيًا فهمه.

واصلت، على مر السنين، التشديد على النسبية في فصولي الخاصة بعلم الفلك، مستمرًا في صقل منهجي في تدريسها. وعندما وقعت وثلاثة من أصدقائي (مارك فويت، وميجان دوناهو، ونيك شنايدر) عقدًا لكتابة مرجع عن علم الفلك، قمنا بتضمين فصلين كاملين عن النسبية، على الرغم من أن الاستطلاعات قد أظهرت أن عددًا قليلا جدًا من أعضاء هيئة التدريس يهتمون بتدريس النسبية في مقرراتهم الخاصة بعلم الفلك للتخصصات غير العلمية. ولدينا على الأقل بعض الشواهد على أن إدراجنا لهذه الفصول قد ألهم المزيد من المدرسين على تضمين هذا الموضوع.

يقودنا ذلك إلى أهدافي من هذا الكتاب. أتمنى أن يساعدك، كقارئ، على اكتساب نفس النوع من التقدير للنسبية الذي حصلت عليه بنفسي، والذي تشاركت فيه أنا وطلابي السابقون والذين اطلعوا على المراجع التي قمت بتأليفها. وأعتقد أنك ستجد أن هذا الموضوع أكثر سهولة بالنسبة للفهم وأكثر إثارة للدهشة مما كنت

تتوقع. وأتمنى أيضًا أن تتفق معي في أن النسبية **مهمة** بالنسبة إلى الطريقة التي نرى بها أنفسنا كبشر في كون شاسع. ونحن نقترب من الذكرى المئوية لنشر أينشتاين لنظريته النسبية العامة في عام ١٩١٥، أعتقد أنه قد آن الأوان لانتشال النسبية من مملكة العلم المبهمة إلى دنيا وعي الجمهور العام. وإذا ساعد هذا الكتاب على تحقيق ذلك، فإنني سأشعر بأنه قد أصاب النجاح.

جيفري بينيت

بولدر، كولورادو

يونيو، ٢٠١٣

الجــزء الأول

البــدايــة

(١)

رحلة إلى ثقب أسود

تخيل أن الشمس انكمشت بفعل قوة سحرية، واحتفظت بنفس كتلتها، ولكنها تقلصت كثيرًا في الحجم حتى أصبحت ثقبًا أسود ***black hole***. ماذا سيحدث للأرض والكواكب الأخرى؟ اسأل أي شخص تقريبًا، بما في ذلك أطفال المدارس الابتدائية، وسيجيبك بثقة أن الكواكب "سيتم ابتلاعها".

والآن تخيل، أنك تسافر في المستقبل بين النجوم، وفجأة تكتشف أن ثقبًا أسود يتربص بك إلى اليسار. ماذا يجب أن تفعل؟ اسأل من حولك ثانية، وسيُقال لك على الأرجح، اطلق محركاتك في محاولة للابتعاد، وستكون محظوظًا إذا استطعت أن تتجنب "ابتلاعك في غياهب النسيان".

ولكني سأطلعك على سر صغير له بالفعل أهمية كبيرة فيما يخص فهم النسبية: أن **الثقوب السوداء لا تبتلع**.. وإذا أصبحت الشمس فجأة ثقبًا أسود، فإن الأرض ستصبح مظلمة وشديدة البرودة. ومع ذلك، بما أننا نفترض بأن الثقب الأسود الذي صارت إليه الشمس له نفس كتلتها، فإن مدار ***orbit*** الأرض لن يتأثر على الإطلاق.

وبالنسبة لمستقبلك كرحالة بين النجوم.. فأولا وقبل كل شيء، فإنك لن تصادف ثقبًا أسود "فجأة" إلى يسارك. فلدينا طرق لاكتشاف العديد من الثقوب السوداء حتى ونحن على الأرض، وإذا استطعنا يومًا ما في الشروع في رحلات بين النجوم فستكون لدينا بالتأكيد خرائط لتنبيهك إلى مواقع أية ثقوب سوداء على طول المسار الخاص بك. وحتى إذا حدث على عكس المتوقع وصادفت واحدًا غير

موجود على خريطتك، فإن تأثير جاذبية هذا الثقب الأسود سيشتد تدريجيًا كلما اقتربت منه، ولذلك فلن يكون هناك شيء مفاجئ فيما يخصه. وثانيًا، إذا لم يحدث وكنت تستهدف بصورة مباشرة تقريبًا الاتجاه إلى الثقب الأسود فإن جاذبيته من شأنها ببساطة أن تؤدي إلى دورانك حوله بطريقة تشبه كثيرًا ما حدث للمركبات الفضائية التي أرسلناها (مثل المركبة الفضائية: **المسافرة** ***Voyager***، والمركبة الفضائية: **آفاق جديدة** (*New Horizons*) اللتين تتأرجحان حول كوكب المشترى في رحلتيها إلى النظام الشمسي الخارجي.

أدرك أن هذا قد يكون مخيبًا جدًا لآمال البعض منكم. وحسب ما صاغته ابنتي في المدرسة المتوسطة "ولكن سيكون لطيفًا أن نظن أن الثقوب السوداء تبتلع". لولا أنني استطعت تهدئتها فقط عندما لفت انتباهها إلى أن الابتلاع واللطف عادة لا يلتقيان". ولعلك ما زلت تتساءل، إذا كانت الثقوب السوداء لا تبتلع، فماذا **تفعل**؟

يتكون الجواب من جزأين، واحد عادي والآخر مذهل تمامًا لدرجة أنك ستنسى للأبد تصوراتك حول وجود مكنسة كهربائية كونية. ينطبق الجزء العادي على ما تمت ملاحظته عن بعد على الثقوب السوداء، حيث إن جاذبية الثقب الأسود لا تختلف عن جاذبية أي شيء آخر من مسافة كبيرة. ولذلك فإن تحول الشمس إلى ثقب أسود لن يؤثر على مدار الأرض، وهذا هو السبب في إمكانية تأرجح المركبة الفضائية بتأثير ثقب أسود مثلما تتأرجح المركبة الفضائية حول كوكب المشترى. ويأتي الجزء المذهل من الإجابة عندما تبدأ في الاقتراب عن كثب من ثقب أسود. وهنا ستبدأ في ملاحظة التشوهات الهائلة في المكان والزمان، والتي لا يمكن أن نفهمها إلا من خلال **نظرية النسبية** لأينشتاين.

ويقودنا هذا إلى لب الموضوع. لقد بدأت هذا الكتاب عن النسبية من خلال الحديث عن الثقوب السوداء بسبب أنه على الرغم من سماع معظم الناس تقريبًا

عنها، فإنك لن تستطيع فعليًا فهم طبيعة الثقوب السوداء إلا إذا فهمت أولاً الأفكار الأساسية التي اكتشفها أينشتاين. وأحد أهداف هذا الكتاب هو مساعدتك على اكتساب ذلك الفهم، ولكن ما زال لدي هدف ثان، جدير أيضًا بالاعتبار.

فعندما تتعلم النسبية، ستجد أن مفاهيمك اليومية الخاصة بالزمان والمكان لا تعكس بدقة واقع الكون. وستدرك، في جوهر الأمر، أنك قد كبرت ولديك "إدراك عام" ليس معقولاً تمامًا كما يبدو. إن هذه ليست غلطتك؛ وإنما هي نتيجة لحقيقة أننا عادة لا نتعرض لظروف حادة تتجلى لنا فيها بوضوح الطبيعة الحقيقية للزمان والمكان. ولذلك فإن الهدف الحقيقي من هذا الكتاب هو مساعدتك على تمييز الواقع من الخيال الذي نشأنا جميعًا عليه، وعلى أن نضع في عين الاعتبار بعض الآثار العميقة لذلك الواقع الذي كان أينشتاين أول من فهمه.

ولنبدأ، دعنا نسافر في رحلة خيالية إلى ثقب أسود. هذه الرحلة ستعطيك فرصة للتعرف على ظرفين يتبدى فيهما أكثر الآثار وضوحًا لأفكار أينشتاين: السرعة التي تقترب من سرعة الضوء، والجاذبية الهائلة الموجودة قرب الثقوب السوداء. وسنركز حاليًا فقط، على ما قد تلاحظه في رحلتك، مؤجلين تعليل **الأسباب** الكامنة وراء ملاحظاتك إلى الفصول التالية.

اختيار ثقب أسود

إذا كنت ستزور ثقبًا أسود فأول خطوة هي أن تجد واحدًا. ولربما تظن أن ذلك سيكون صعبًا، نظرًا لأن مصطلح **ثقب أسود** يشير إلى شيء قد لا يكون مرئيًا في عتمة الفضاء. وهناك بعض الحقيقة في ذلك. وبحكم التعريف، فإن الثقب الأسود هو جسم لا يستطيع الضوء أن ينفذ منه، مما يعني أن أي ثقب أسود منفصل سيكون معتمًا لا مرئيًا بالفعل. ومع ذلك وبقدر ما نعلم، فإن كتلة جميع

الثقوب السوداء هي أيضًا كبيرة جدًا، أكبر عدة مرات من كتلة شمسنا على الأقل، وفي بعض الأحيان أكبر من ذلك بكثير. ونتيجة لذلك، يمكننا من حيث المبدأ، أن نتعرف على الثقوب السوداء عن طريق تأثير جاذبيتها على ما يحيط بها.

ويمكن أن تتبدى قوة جاذبية الثقب الأسود بطريقتين أساسيتين. أولاً، قد يتم الكشف عن الثقب الأسود بتأثيره على مدارات مرافقة يكون من السهل رؤيتها. فعلى سبيل المثال، افترض بأنك تلاحظ نجمًا ما يدور بوضوح حول جسم ثقيل آخر، ولكن هذا الجسم الآخر لا يلمع مثله، لذا فإن هذا الجسم لن يكون سوى نجم. وحيث إن **شيئًا ما** ينبغي أن يكون موجودًا ليبرر مدار هذا النجم المرئي، فمن الممكن على أقل تقدير أن يكون هذا الشيء عبارة عن ثقب أسود.

ثانيًا، قد يتم الكشف عن ثقب أسود من خلال الضوء المنبعث من الغازات التي تحيط به. وعلى الرغم من أننا غالبًا نعتقد بأن الفضاء فارغ، فإنه ليس فارغًا تمامًا، فستجد دائمًا بضع ذرات شاردة حتى في أعماق الفضاء بين النجوم. **والسُدُم** الجميلة التي تراها في الصور الفلكية هي في الحقيقة سحابات هائلة من الغازات. وأية غازات يتصادف أن تكون موجودة قرب ثقب أسود سينتهي بها الأمر إلى أن تدور حوله، وبسبب أن الثقب الأسود يكون صغيرًا جدًا في الحجم وكبيرًا جدًا في الكتلة، فإن الغازات التي تكون قريبة منه يجب أن تدور حوله بسرعة شديدة جدًا. والغازات التي تتحرك بسرعة شديدة تميل درجة حرارتها إلى الارتفاع، وينبعث من الغازات المرتفعة الحرارة ضوء له طاقة هائلة، مثل الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية. ولذلك، فإنك إذا ما رأيت انبعاثًا للأشعة السينية قادمًا من منطقة تحيط بجسم مصمت، فإن هناك احتمالا بأن ذلك الجسم عبارة عن ثقب أسود.

ويمكنك أن ترى تحقق هاتين الفكرتين معًا في حالة الثقب الأسود المشهور **الطائر السيني** [١] (*Cygnus X-1*) الذي سمي بهذا الاسم لوقوعه في المجموعة

النجمية الطائر (*Cygnus*)، وهو مصدر انبعاث هائل للأشعة السينية. والطائر السيني ١ هو نظام ثنائي، بمعنى أنه نظام يحتوي على جسمين هائلين في الكتلة يدور أحدهما حول الآخر. وتحتوي معظم النظم الثنائية على نجمين يدور أحدهما حول الآخر، ولكن في حالة الطائر السيني ١ فإننا لا نستطيع أن نرى غير نجم واحد. ويدلنا مدار هذا النجم على أن كتلة ذلك الجسم الثاني تزيد نحو ١٥ مرة على كتلة شمسنا، لكنه لا يظهر لنا بصورة مباشرة بأي شكل كان. وعلاوة على ذلك، فإن النجم المرئي ليس ساخنًا بما يكفي لإنتاج هذا الكم من الانبعاث للأشعة السينية الذي نلاحظه في هذا النظام، ولذلك فإن تلك الأشعة السينية ينبغي أن تكون منبعثة من الغازات الشديدة السخونة التي تحيط بالجسم الثاني. وبذلك يصبح لدينا دليل مزدوج على إمكانية وجود ثقب أسود: نجم يدور حول كتلة هائلة ولكنها غير مرئية، وانبعاث للأشعة السينية يشير إلى أن هذا الجسم غير المرئي كثيف جدًا بما يعزز وجود تلك الغازات الشديدة السخونة التي تدور حوله. وبطبيعة الحال، فإننا قبل أن نخلص إلى أن ذلك الجسم غير المرئي هو ثقب أسود، فإننا يجب أن نستبعد احتمالية أنه قد يكون نوعًا من الأجسام الأخرى التي تكون صغيرة وكتلتها هائلة. وسوف نناقش الطريقة التي نقوم بها بذلك في فصل ٧، ولكن الأدلة الحالية تشير بقوة إلى أن الطائر السيني ١ يحتوي حقًا على ثقب أسود.

ومن المعروف الآن أن هناك العديد من الأنظمة المماثلة، وبالجمع بين ملاحظاتنا وما نفهمه حاليًا حول السير النجمية، فإننا قد تعلمنا أن معظم الثقوب السوداء هي بقايا نجوم هائلة الكتلة (نجوم هي أكبر ١٠ مرات من كتلة الشمس على أقل تقدير) تلك النجوم قد خمدت، بمعنى أنها قد استنفدت الوقود الذي يبقيها مضيئة وقتما كانت نجومًا "نابضة". ومع تقدمنا التكنولوجي الحالي فإننا نستطيع أن نتعرف فقط على الثقوب السوداء التي تشبه الثقب الموجود في الكوكب السيني ١،

مدار لنظم ثنائية ما زالت فيها نجوم نابضة. أما الثقوب السوداء الأخرى التي يكون فيها نجم وحيد، أو تلك الموجودة في أنظمة ثنائية ولكن نجمايها قد خمدا منذ وقت طويل، فمن الصعوبة بمكان أن نكتشفها، لأنه لا يوجد نجم نابض له مدار نستطيع أن نلاحظه، وبسبب أن كمية الغازات التي تدور حولهما صغيرة جدًا بحيث لا تنبعث منها كمية كبيرة من انبعاث الأشعة السينية. وعدد تلك الثقوب السوداء هو أكبر بكثير من تلك التي نستطيع التعرف عليها في الوقت الراهن، ومع ذلك، سنفترض أننا قد نكتشفها عندما يحين ذلك الوقت الذي تكون أنت فيه على استعداد لرحلتك إلى ثقب أسود.

وبالإضافة إلى الثقوب السوداء التي هي عبارة عن بقايا نجوم مفردة قد خمدت، فإن هناك فئة أخرى شائعة ومثيرة للاهتمام من الثقوب السوداء: الثقوب السوداء **الفائقة الكتلة** الموجودة في مراكز المجرات (أو، في بعض الحالات، في وسط مجموعات كثيفة من النجوم). ومنشأ هذه الثقوب السوداء ما زال غامضًا، ولكن كتلتها الهائلة تساعد نسبيًا في سهولة التعرف عليها. ونلاحظ في مركز مجرتنا درب التبانة على سبيل المثال، نجومًا تدور بسرعة عالية حول جسم مركزي ما؛ وتبين تلك السرعة العالية أن هذا الجسم لا بد أن تكون كتلته أكبر من كتلة الشمس بنحو ٤ ملايين مرة، ولكن قطره لا يزيد كثيرًا على قطر نظامنا الشمسي. ووجود ثقب أسود هو فقط الذي يفسر هذا التركيز الشديد جدًا للكتلة في مثل هذا الحجم الصغير من الفضاء. ويتضح أن معظم المجرات الأخرى، بها أيضًا ثقوب سوداء فائقة الكتلة في مراكزها. وفي بعض الحالات القصوى، قد تكون كتلة هذه الثقوب السوداء أكبر **ببلايين** المرات من كتلة الشمس.

بعد هذه الخلفية العامة حول مواقع الثقوب السوداء، فإننا مستعدون لاختيار الوجهة التي ستقصدها رحلتك. نستطيع من حيث المبدأ اختيار أي ثقب أسود،

ولكن رحلتك ستسير بصورة أفضل إذا ما اخترنا واحدًا قريبًا منا نسبيًا، ولا يدور حوله الكثير من الغازات الساخنة حتى لا يتداخل ذلك مع ما سنقوم به من تجارب. وعلى الرغم من أننا لم نتيقن بعد، فإن الإحصائيات تبين أن هناك فرصة مناسبة لوجود ثقب أسود في نطاق ٢٥ سنة ضوئية من الأرض تقريبًا. ولذلك، دعنا نفترض أن رحلتك الخيالية ستأخذك إلى مسافة تبعد عنا ٢٥ سنة ضوئية.

رحلة من الأرض - ذهاب وعودة

في **جولة بين النجوم، وحرب الكواكب** والكثير من قصص الخيال العلمي الأخرى، فإن السفر لمسافة ٢٥ سنة ضوئية هو أكثر قليلا من نزهة صغيرة حول منعطف، وهذا صحيح، حيث انها مسافة قريبة فعليًا بالنسبة للمجرة ككل. ويمكنك أن تدرك السبب من خلال النظر إلى اللوحة التي توضح أبعاد مجرتنا درب التبانة في الشكل ١-١، فعرض مجرتنا نحو ١٠٠٠٠٠ سنة ضوئية، ويقع نظامنا الشمسي في منتصف المسافة من مركز المجرة إلى أحد حوافها. ونظرًا لأن مسافة الـ٢٥ سنة ضوئية من الأرض إلى ثقبنا الأسود هي مجرد ٠,٠٢٥% من قطر المجرة الذي يبلغ ١٠٠٠٠٠ سنة ضوئية، فإن طول المسافة الكلية لرحلة الـ٢٥ سنة ضوئية يمكن تمثيلها بنقطة صغيرة جدًا بسن القلم الرصاص على اللوحة.



شكل (١-١) مجرة درب التبانة *Milky Way Galaxy*

تمثل هذه اللوحة مجرتنا درب التبانة، التي يبلغ قطرها نحو ١٠٠٠٠٠ سنة ضوئية. وإذا ما وضعت نقطة صغيرة جدًا بسن القلم الرصاص فإنها ستمثل مسافة أكبر بكثير من مسافة الـ ٢٥ سنة الضوئية لرحلتك الخيالية إلى الثقب الأسود.

ومع ذلك، فإن ٢٥ سنة ضوئية هي مسافة كبيرة جدًا بالمقاييس الإنسانية. فالسنة الضوئية ***light-year*** هي **المسافة** التي يقطعها الضوء في عام، ويسافر الضوء بسرعة حقًا. وسرعة الضوء هي نحو ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية (١٨٦٠٠٠ ميل في الثانية)، مما يعني أن الضوء يمكن أن يدور حول الأرض ثماني مرات تقريبًا في ثانية واحدة. وإذا ما قمت بضرب سرعة الضوء في ٦٠ ثانية في الدقيقة، و٦٠ دقيقة في الساعة، و٢٤ ساعة في اليوم و٣٦٥ يومًا في السنة، فستجد أن السنة الضوئية تنقص قليلا جدًا عن ١٠ تريليونات كيلومترا (٦ تريليون ميل)، لذلك فإن مسافة الـ٢٥ سنة ضوئية تعني السفر لمسافة ٢٥٠ تريليون كيلومتر تقريبًا في الذهاب ومثلها في العودة.

وهناك العديد من الطرق التي نضع بها منظور هذه المسافة. وطريقتي الشخصية المفضلة هي وضع تصور لنظامنا الشمسي بمقياس قيمته **واحد على عشرة بلايين** من حجمه الحقيقي، وهو الحجم الذي يتم تمثيله في رحلة مقياسية لنموذج النظام الشمسي (شكل ٢-١). وحجم الشمس تقريبًا في هذا المقياس مثل حجم ثمرة الجريب فروت، في حين أن حجم الأرض أصغر من الكرة الموجودة في سن القلم الجاف وتقع على بعد نحو ١٥ مترًا من الشمس. والقمر الذي هو أبعد مكان استطاع أن يسافر إليه الإنسان فيما مضى من وقت، هو على بعد مسافة عرض إبهام من الأرض على هذا المقياس. وإذا ما قمت بزيارة واحد من هذه النماذج فإنك تستطيع أن تقطع المسافة بين الشمس والأرض في نحو ١٥ ثانية، ولن تستغرق سوى بضع دقائق للوصول إلى الكواكب الأبعد. ولكن السنة الضوئية على هذا المقياس هي ١٠٠٠ كيلومتر (لأن السنة الضوئية هي ١٠ تريليونات كيلومتر وقسمة ١٠ تريليونات على ١٠ بلايين هي ١٠٠٠)، مما يعني أنه يجب أن تسافر عبر الولايات المتحدة (مسافة ٤٠٠٠ كيلومتر تقريبًا) لتقطع فقط مسافة ٤ سنوات ضوئية، وهي المسافة التي يبعد بها عنا أقرب النجوم طبقًا لهذا المقياس. وبالنسبة لمسافة الـ٢٥ سنة ضوئية التي تتعلق بالرحلة إلى الثقب الأسود فإننا لا نستطيع تمثيلها على الأرض عن طريق مقياس نموذج رحلة.

وتمثل هذه المسافة تحديًا رئيسيًا للرحلة إلى الثقب الأسود. فلا تستطيع التكنولوجيا الحالية أن تساعدك على الذهاب إلى ثقب أسود في حياتنا أو حتى بعد عدة أجيال. وتسافر أسرع مركبة فضائية قمنا ببنائها للسفر عبر الفضاء بسرعة ٥٠٠٠٠ كيلومتر في الساعة تقريبًا، بما يساوي نحو ١٤ كيلومترًا في الثانية. وهذه السرعة كبيرة جدًا بالمقاييس البشرية، وهي في الحقيقة أسرع ١٠٠ مرة تقريبًا من "سرعة الرصاصة". ومع ذلك، فإنها أقل من ١ على ٢٠٠٠٠ من سرعة الضوء، مما يعني أنك تحتاج إلى أكثر من ٢٠٠٠٠ سنة لتقطع المسافة التي

يقطعها الضوء في سنة واحدة. وبالنسبة لسفينة الفضاء التي تستغرق ٢٠٠٠٠ سنة حتى تقطع سنة ضوئية واحدة، فإن رحلة الـ٢٥ سنة ضوئية إلى الثقب الأسود ستستغرق أكثر من ٥٠٠٠٠٠ سنة.



شكل (٢-١)

توضح هذه الصورة الشمس (الكرة الموجودة على أقرب الأعمدة والكواكب الداخلية في "رحلة مقياسية لنموذج النظام الشمسي" في واشنطن، ويمثل هذا النموذج نظامنا الشمسي بمقياس ١ على ١٠ بلايين. وبينما يمكنك السير لمدة بضع دقائق حتى تصل إلى جميع الكواكب على هذا النموذج، فإنه ينبغي عليك أن تسافر عبر الولايات المتحدة لتصل إلى أقرب النجوم. وبالنسبة لمسافة الـ٢٥ سنة ضوئية التي تتعلق بالرحلة إلى الثقب الأسود فإننا لا نستطيع تمثيلها على الأرض بهذا المقياس.

وقد تم افتتاح نماذج مشابهة في عدة مدن؛ للمزيد من الاطلاع انظر:

ولذلك ستتطلب رحلتك الخيالية وجود تكنولوجيا خيالية أيضًا. وربما يكــون اختيارك الأول أن تتخيل شيئًا شبيهًا بالسفر بمحرك الاعوجاج (*) ***warp drive*** فــي قصة **جولة بين النجوم** والتي قد تسمح لك باجتياز رحلتك في عدة أسابيع أو أقــل من ذلك، ولكني سأقوم حاليًا بدحض هذه الرغبة. فعلى الرغم من أن السفر بمحرك الاعوجاج أو شيء من هذا القبيل **ربما** يكون ممكنًا (سوف نناقش هذه الفكــرة لاحقًا)، فإن مثل هذه الأمور تقع خارج نطاق ما يمكننا في الوقت الراهن فهمه والتحقق منه علميًا. ولذلك، سيتم وضع حدود لسرعتك طبقًا لمفاهيم أينشتاين التــي تمنع الانتقال بسرعة أكبر من سرعة الضوء. ومع أن نظرية أينشتاين لم تحدد إلى أي مدى يمكن أن تسير بسرعة أقرب إلى سرعة الضوء. ويعود ذلــك فقــط إلــى وجود حلول عملية للوصول إلى طريقة يمكن بها السفر بسرعة عالية جــدًا. لهــذا دعنا نفترض أن هندسة المستقبل ستجد وسيلة ما لتيسير إمكانيــة الــسفر بــسرعة عالية جدًا، مما يسمح بقيامك بالرحلة بسرعة ٩٩% من سرعة الضوء. وللتبــسيط فيما نكتبه، فسوف نسمي هذه السرعة ***0.99 c***، حيث يمثل الحرف *c* سرعة الضوء.

من السهل أن تدرك الطريقة التي سيتم بها استعراض رحلتك مــن منظــور أصدقائك الذين ظلوا على الأرض. ولأن سفرك سيكون بسرعة أبطــأ قلــيلا مــن سرعة الضوء، فإنك ستستغرق وقتًا أطول قليلا من الذي يستغرقه الــضوء للقيــام بالرحلة. وبتعبير أكثر دقة، يستغرق الضوء ٢٥ سنة ضوئية في كل اتجــاه، أو ٥٠ سنة في رحلة الذهاب والإياب، وفي رحلتك ذهابًا وإيابًــا بــسرعة ٠,٩٩ *c* فإنــك

(*) محرك الاعوجاج: آلية تثني أو تطوي الزمكان لجلب النقاط البعيدة إلى الاتصال في الفضاء المتعدد الأبعاد، مما يسمح لك بالانتقال بسرعة فيما بينها. (المترجم).

ستستغرق ٥٠ عامًا وستة أشهر (التي هي ناتج قسمة ٥٠ سنة على ٠,٩٩). فإذا غادرت الأرض في وقت مبكر من عام ٢٠٤٠، وأخذت بعين الاعتبار أنك ستحتاج إلى ٦ أشهر للاختبارات التي ستقوم عند في الثقب الأسود، فإنك سوف تعود إلى الأرض في وقت مبكر من عام ٢٠٩١.

ونتوقع بحدسنا العادي، أن الرحلة ستبدو مشابهة لذلك تمامًا بالنسبة لك، وتقتضي ٥١ عامًا، بما في ذلك الوقت الذي تمكثه عند الثقب الأسود. **ولكن** هذا لن يكون. وإليك ما سوف يحدث في حقيقة الأمر.

لغرض تبسيط الأمور، دعنا نفترض أنك سوف تسافر رحلتك كلها بسرعة *0.99 c*. (في الحقيقة، إنك ستتحول إلى أشلاء بفعل القوى المتعلقة بالتسارع ***acceleration*** المفاجئ إلى مثل هذه السرعة العالية – أو بالتباطؤ المفاجئ في محطات الوصول – ولكننا سنتجاهل ذلك). ومجرد أن تمضي قدمًا، ستكتشف المفاجأة الأولى: إن النجوم القريبة من الثقب الأسود ستكون أكثر لمعانًا مما رأيتها عليه سابقًا[1]، كما لو أنها قد أصبحت على حين غرة أكثر قربًا منك. وفي الحقيقة أنه، إذا أمكنك قياس المسافة التي بينك وبين الثقب الأسود ستكتشف أنها لم تعد ٢٥ سنة ضوئية كما كانت عليه عند قياسك لها وأنت على الأرض، ولكنها قد تقلصت

(١) إن ما تشاهده، عند سرعات عالية، سيكون في حقيقة الأمر أكثر تعقيدًا مما أقوله هنا، نظرًا لتأثير عناصر إضافية أخرى إلى جانب التغيير في المسافة. وفي هذه الحالة، على سبيل المثال، سيتأثر منظر النجوم ليس فقط بالقصر في المسافة، ولكن أيضًا بالتغيير في التردد الموجي الناجم عن حركتك باتجاهها (أو بعيدًا عنها)، بالإضافة أيضًا إلى التأثيرات البصرية الناتجة عن الاختلافات في الوقت الذي يقطعه الضوء الصادر عن الأجسام الموجودة عند مسافات مختلفة. وفي هذا الكتاب، فإنني عندما أحدثك عما "ستراه" فإنني أعني في حقيقة الأمر، ما سوف تستدل عليه بعد أن تأخذ بعين الاعتبار جميع العوامل التي تؤثر على المظاهر الفعلية.

إلى نحو ثلاث سنوات ونصف السنة. ونتيجة لذلك، فإن السفر بسرعة *0.99 c* سيسمح لك بالوصول إلى الثقب الأسود في وقت يزيد قليلا على ثلاث سنوات ونصف. وستستغرق رحلة العودة مثلها، وبالإضافة إلى الشهور الستة التي ستمضيها عند الثقب الأسود فإنك لن تغيب عن الأرض سوى سبع سنوات ونصف السنة. وإذا راجعت الأيام التي مرت على التقويم بعد مغادرتك للأرض في أوائل عام ٢٠٤٠، فسيبين التقويم الخاص بك أنك ستعود إلى الأرض في منتصف عام ٢٠٤٧.

تريث وفكر قليلا في هذا. تقويمك يبين أنك غبت فقط سبع سنوات ونصف السنة حتى عام ٢٠٤٧. وإنك ستحتاج إلى لوازم لرحلة مدتها سبع سنوات ونصف فقط، وأنك ستكبر في السن بسبع سنوات ونصف عما كنت عليه قبل مغادرتك. ولكن جميع التقاويم الموجودة على الأرض ستقول إنها سنة ٢٠٩١. وسيصبح أصدقاؤك وعائلتك أكبر في السن بـ٥١ سنة عما كانوا عندما غادرتهم. وسيتقدم المجتمع بما يعادل قدر التغيرات الثقافية والتكنولوجية التي تحدث في ٥١ سنة. وبعبارة أخرى، فإنك ستعود لتجد أن ٥١ سنة قد مرت على الأرض، على الرغم من مرور سبع سنوات ونصف السنة فقط بالنسبة لك. إنك لن تشعر بشيء غير عادي أثناء رحلتك، ولكن الوقت **ذاته** هو الذي قد مر ببطء أكثر بالنسبة لك عما هو على الأرض.

وإذا لم يكن لديك سابق اطلاع على نظريات أينشتاين، فربما تجد صعوبة في الاعتقاد بما أقول. وذلك صحيح، حيث إنني لم أقدم لك حتى الآن مبررات لتصدقني؛ وأتمنى أن أقوم بذلك فيما يلي من فصول. ويكفيني حاليًا أن أقول، إنني قد أطلعتك للتو على عينة من النتائج الهائلة التي تتوقعها نظرية أينشتاين عند السفر بسرعة تقترب من سرعة الضوء. والآن، دعنا نعود إلى ما كنا عنده في منتصف رحلتك وأنت تقترب من الثقب الأسود.

والخطوة الأولى في فهم اقترابك من الثقب الأسود، هي أن تتذكر كيف أن السفر عبر الفضاء يختلف عن السفر على الأرض. على الأرض، يؤدي إطفاء محرك مركبتك إلى التباطؤ ثم إلى التوقف في نهاية المطاف. والسبب هو الاحتكاك، إما مع سطح الأرض أو مع الماء أو مع الهواء. في الفضاء، حيث لا يوجد أي احتكاك، فإنه من الممكن أن تطفئ محركاتك وتستمر في المضي قدمًا إلى الأبد، ما دام أنك لم تصطدم بأي شيء. وبصرف النظر عن تشغيل محركاتك فإن الشيء الوحيد الذي يمكن أن يؤثر على سرعتك ومسارك هو الجاذبية. ولذلك، فإنه حتى تفهم ما سيحدث عند اقترابك من الثقب الأسود، فإنك ستحتاج إلى فهم الطريقة التي يمكن أن تؤثر بها الجاذبية على مسارك.

في حياتنا اليومية، نظن عادة أن المدار هو مسار تمضي فيه الأجسام في جولة تلو أخرى. ومع ذلك، عندما نتكلم عن الفضاء، فإن المدار هو أي مسار لا يخضع إلا للجاذبية، ولا يشكل مصدر هذه الجاذبية أي فرق، سواء أكان كوكبًا أم نجمًا أم ثقبًا أسود أو أي جسم آخر.

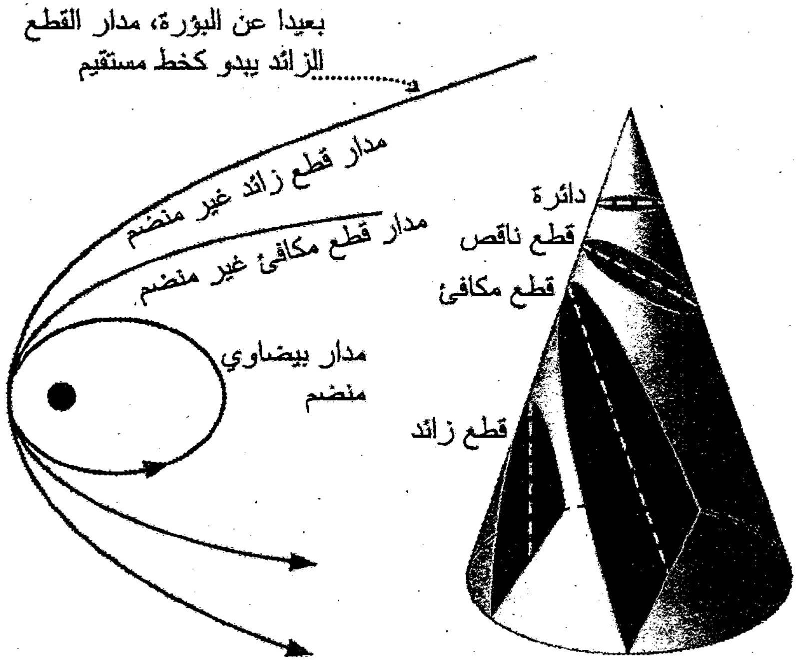
وقد تم استنباط الخصائص العامة للمدارات منذ ما يزيد على ٣٠٠ سنة بواسطة إسحق نيوتن. واكتشف أن المدارات قد يكون لها ثلاثة أشكال أساسية: هي: القطع الناقص والقطع المكافئ والقطع الزائد. (وتعد الدوائر حالة خاصة لأشكال القطع الناقص بنفس الطريقة التي يعد بها المربع حالة خاصة للمستطيل). وتسمى هذه الأشكال غالبًا "مقاطع مخروطية"، لأنك تستطيع تكوينها عند عمل مقاطع في مخروط بزوايا مختلفة. ويبين شكل (١-٣) هذه الأشكال الثلاثة وطريقة عمل ذلك.

وعليك أن تهتم اهتمامًا خاصًا بثلاث نقاط عند النظر إلى المدارات الممكنة في شكل (١-٣). أولاً، لاحظ أن أشكال القطع الناقص (بما في ذلك الدوائر) هي

المسارات المدارية الوحيدة التي تمضي في جولة ثم أخرى وتعود إلى مكانها نفسه في كل دورة. ويفسر هذا، السبب في أن أشكال القطع الناقص تخطر عادة على بالنا عندما نفكر في كلمة **مدار**، لأن هذا يعني أن كل الأقمار لها مدارات بيضاوية حول كواكبها، وكل الكواكب لها مدارات بيضاوية حول نجومها وكل النجوم لها مدارات بيضاوية حول مجرتها.

والملاحظة المهمة الثانية في شكل (١-٣) هي الاختلاف بين **المدارات المنضمة وغير المنضمة**. ونحن نقول عن أشكال القطع الناقص إنها **مدارات منضمة** لأن الأجسام التي بها تظل مرتبطة بجسم مركزي عن طريق الجاذبية. أما مدارات القطع المكافئ والقطع الزائد فإنها **غير منضمة**، لأن الأجسام التي بها تتحرك نحو جسم مركزي وعندما تتأرجح بعيدًا عنه فإنها لا تعود إليه أبدًا، مما يعني أن جاذبية ذلك الجسم المركزي ليس لها تأثير دائم عليها. ومعظم المدارات غير المنضمة هي مدارات قطع زائد(١).

(١) يكون الاختلاف بين القطع المكافئ والقطع الزائد فقط في شكله بالنسبة للجسم المركزي من مسافة كبيرة. فالقطع المكافئ يكون منحنيًا حول الجسم المركزي، بينما لا يختلف القطع الزائد من مسافة كبيرة عن الخط المستقيم. ورياضيًا، هناك نطاق أكبر من الاحتمالات بالنسبة للقطع الزائد عن القطع المكافئ (الذي هو حالة ما بين القطع الزائد والقطع الناقص)، وذلك هو السبب في أن معظم المدرات غير المنضمة هي قطع زائد.



شكل (٣-١) المدارات التي تسمح بها الجاذبية

منذ ما يزيد على ٣٠٠ سنة، اكتشف إسحاق نيوتن أن الجاذبية تسمح بثلاثة مسارات مدارية فقط وهي الموضحة إلى اليسار. ويوضح المخروط على اليمين أن هذه الأشكال يمكن صنعها بعمل مقاطع خلال مخروط، وهذا هو السبب في أنها تسمى مقاطع مخروطية؛ علمًا بأن الدائرة هي ببساطة حالة خاصة من القطع الناقص.

والملاحظة المهمة الثالثة، هي أن القطع الناقص والقطع المكافئ والقطع الزائد تمثل قائمة المدارات المسموح بها فقط. وبسبب أن **الابتلاع** غير موجود على هذه القائمة، فإنك تدرك الآن الحقيقة التي أخبرتك عنها سابقًا: أن **الثقوب السوداء**

لا تبتلع. والجاذبية هي قوة شد تحددها كتلة الجسم. وعلى مسافة كبيرة لا تختلف جاذبية الثقب الأسود عن جاذبية أي جسم آخر له نفس الكتلة. ولن تشعر بنتائج مختلفة لهذا التأثير عما كان يفهمه نيوتن إلا عندما تقترب جدًا[١] من الثقب الأسود، ونفترض أنك ستظل حاليًا على مسافة تكون في نطاق المسارات المدارية التي اكتشفها نيوتن.

نستطيع الآن تطبيق هذه الأفكار على سفينتك الفضائية. ولأنك قادم تجاه الثقب الأسود من مسافة بعيدة، فستكون في مدار قطع زائد غير منضم. ولذلك، فإنك إذا لم تشغل محركاتك فستستمر في هذا المسار غير المنضم، مما يعني أنك بمجرد ما تنحرف بعيدًا عن الثقب الأسوّد، فإنك لن تعود إليه مرة أخرى. والطريقة الوحيدة للتغلب على هذا ستكون أن تستهدف تمامًا الاقتراب من الثقب الأسود، وفي تلك الحالة فإنك ستندفع إليه بسرعة كبيرة قبل أن يأخذك مدارك بعيدًا عنه. ومع ذلك، فإن هذا غير مرجح بالمرة. ولتتذكر أنه على الرغم من أن الثقوب السوداء كبيرة في كتلتها، فإنها صغيرة في الحجم. وعلى سبيل المثال، فإن الثقب الأسود الذي تزيد كتلته على الشمس بعشر مرات يكون عرضه نحو ٦٠ كيلومترًا. ويجعله هذا جسمًا يقترب بالكاد من حجم مدينة كبيرة على الأرض وأصغر من العديد من الكويكبات. وبعد سفرك لمسافة ٢٥٠ تريليون كيلومتر، فإنك ستكون أسوأ الأشخاص حظًا في التاريخ إذا اندفعت مباشرة إلى الثقب الأسود عن طريق المصادفة.

---

(١) يعني "الاقتراب جدًا" في هذه الحالة أن تكون في حدود ١٠٠ كيلومتر من الثقب الأسود. (وبصفة أكثر عمومية)، أن تكون في حدود نصف قطر شفارتزشيلد من أفق الحدث، وهي فكرة سنحددها في فصل٧). وعند هذه المسافة فقط لن تسري عليك القوانين الثابتة لنيوتن عن المدارات. وفي الحقيقة، سيبدو الأمر وكأنه قد تم "ابتلاعك" داخل هذه المنطقة، ومع ذلك، فإننا سنقدم في فصل ٧ طريقة أفضل في فهم هذا.

والنتيجة العملية لكل هذا، أن الطريقة الوحيدة التي تمنع بها نفسك من التأرجح بعيدًا عن الثقب الأسود بسرعة عالية هي أن تستخدم محركاتك لإبطاء سفينتك الفضائية. وإذا قمت بضبط التشغيل بصورة صحيحة تمامًا، فإنك ستدخل بسفينتك الفضائية إلى مدار منضم حول الثقب الأسود.

لنفترض أنك فعلت ذلك، ولهذا ستكون سفينتك الفضائية الآن "مستقرة" ومحركاتها مطفأة في مدار دائري على بعد عدة آلاف من الكيلومترات من الثقب الأسود. وستكون قوة الجاذبية التي تشد سفينتك إلى المدار قوية بما فيه الكفاية؛ حيث إن قوة الجاذبية تعتمد على كل من كتلة الجسم المركزي والمسافة التي تفصلك عنه، وبضعة آلاف من الكيلومترات تجعلك قريبًا جدًا من جسم كتلته أكبر من الشمس. وعلى الرغم من ذلك، فإنك في أمان تام – ولا داعي لأن تنزعج حول "ابتلاعك فيه" – وبمقدورك أن تستمر في مدارك حوله جولة بعد أخرى حسبما يحلو لك.

ملاحظات من المدار

من موقع المراقبة المداري الذي أنت فيه، فإن الأمور ستبدو لك في البداية عادية تمامًا. فيما عدا أن سفينتك الفضائية تدور، وأنك تعوم دون وزن داخلها، وأية ساعات موجودة على الجدران ستقوم بتسجيل الوقت بصورة طبيعية. ومن مسافة آلاف الكيلومترات، وبسبب وجود غازات قليلة جدًا لا تكفي لأن ينبعث منها الضوء، فإن الثقب الأسود لن يكون مرئيًا بالمرة. وبغض النظر عن حقيقة أنك تدور حول جسم غير مرئي بسرعة عالية نسبيًا (لأن الجاذبية القوية تعني أن الاستقرار في المدار يتطلب وجود سرعة عالية)، سيكون هناك القليل الذي يشير إلى أنك على مقربة من ثقب أسود.

ومع ذلك، فإنك لم تأت كل هذه المسافة من أجل لا شيء، لذلك فإنك ستقرر إجراء بعض التجارب. وبالنسبة لتجربتك الأولى، ستلتقط ساعتين متطابقتين من خزانة السفينة، لكل منهما أرقام تتوهج باللون الأزرق. وستضبطهما على نفس التوقيت، وتحتفظ بإحداهما على سطح السفينة، وتدفع الأخرى برفق إلى الخارج من السدادة الهوائية باتجاه الثقب الأسود، وبها صاروخ صغير متصل بها. وستكون قد قمت ببرمجة الصاروخ على الاشتعال المستمر بحيث تندفع الساعة ببطء بعيدًا عن سفينتك وفي اتجاه الثقب الأسود. وستبدأ على الفور في ملاحظة أن الساعة التي في الخارج تسلك سلوكًا غريبًا.

فعلى الرغم من أن كلتا الساعتين بدأتا بقراءة نفس التوقيت بأرقامهما الزرقاء، فسوف تلاحظ في الحال أن الساعة التي تسقط باتجاه الثقب الأسود تعمل ببطء على نحو ملحوظ. وعلاوة على ذلك، فإنها كلما ابتعدت عنك يتغير لون أرقامها الزرقاء تدريجيًا، ويصبح أكثر احمرارًا. وهاتان الملاحظتان– دقاتها الأكثر بطئًا واحمرار أرقامها– ناتجتان عن تأثير مهم توقعه أينشتاين: أن **الوقت يمضي بصورة أكثر بطئًا عند وجود جاذبية قوية.**

من الواضح تمامًا أن الوقت الأكثر بطئًا سيجعل تكة الساعة أكثر بطئًا. والسبب في احمرار الأرقام أقل وضوحًا إلى حد ما، ولكن يمكن أن تفهمه على النحو التالي. الساعة نفسها ستشعر أن حالتها عادية (إذا كانت لديها مشاعر)، ولذلك فمن وجهة نظر الساعة الخاصة، سينبعث من أرقامها ضوء أزرق كما هو معتاد. وكل أشكال الضوء يمكن اعتبارها موجات تهتز بتردد ما، ويكون تردد الضوء الأزرق نحو ٧٥٠ تريليون دورة في الثانية، في حين أن تردد الضوء الأحمر هو أقل نوعًا ما (نحو ٤٠٠ تريليون دورة في الثانية). وتذكر الآن أنه من موقع المراقبة الخاص بك على متن السفينة، تعمل الساعة التي تسقط ببطء كلما

ابتعدت، مما يعني أن الثانية الواحدة للساعة المبتعدة هي **أطول** من الثانيـة عنـدك. ولذلك، خلال كل ثانية عندك، ستشاهد فقط جزءًا من الـ ٧٥٠ تريليون دورة التـي تبعثها ثواني الساعة المبتعدة. ولذلك فسوف تلاحظ أن تردد الضوء المنبعـث أقـل من الـ ٧٥٠ تريليون دورة في الثانية الخاصة بالـضوء الأزرق، والتـردد الأقـل للضوء يعني الاحمرار في اللون. وهذا التأثير، الذي يحدث عندما تتعرض أجـسام لتأثير قوي للجاذبية فينبعث منها ضوء أحمر على خلاف ما هي عليه يُطلق عليـه **الانزياح نحو اللون الأحمر للجاذبية** ***gravitational redshift***.

نعود مرة أخرى إلى مراقبة الساعة. وحتى تحافظ على هبوطهـا البطـيء باتجاه الثقب الأسود، فإن صاروخ الساعة يجب أن يشتعل بقوة أشد خلال نزولهـا بعيدًا عن سفينتك. وهذا لا يمكن إدامته لأن الوقود الموجـود بالـصاروخ سـينفد. وعندما يحدث هذا، فسيكون الأمر وكأنك قد سحبت دعامتها، وستبدأ الـساعة فـي التسارع بشدة باتجاه الثقب الأسود. وعند ذلك ستحدث أمور غريبة حقًا.

بالنسبة للساعة، فإنها تهبط باتجاه الثقب الأسود مثلما تهبط أية صخرة باتجاه الأرض، فيما عدا أن الجاذبية ستكون أقوى بما لا يقارن. ولذلك ستتسارع الـساعة بسرعات أعلى وأعلى وهي تقترب من الثقب الأسود، ممـا يعنـي أنهـا ستـسيقط بسرعة فيه. وعليك أن تنتبه إلى ملاحظة أنها قد **سقطت** تمامًا داخل الثقب الأسـود مثلما يحدث عندما تسقط صخرة على الأرض؛ ولم يتم "ابتلاعها فيه".

عند النظر للأمر من مكان الساعة يبدو الأمر بسيطًا جـدًا. ولكـن الأمـور ستبدو مختلفة تمامًا في لوحة المراقبة على السفينة. في البداية، سترى أن الـساعة تتسارع باتجاه الثقب الأسود، مثلما ترى الساعة ذلك هي نفسها. ولكن عندما تستمر في مشاهدة اقتراب الساعة من الثقب الأسود ستجد أن التسارع يعادله التباطؤ فـي الزمن. ستصبح تكتكة الساعة أبطأ فأبطأ كلما اقتربت من المكان الذي يُدعى **أفـق**

حدث الثقب الأسود. وفي الحقيقة، إذا كان بمقدورك الاستمرار في مراقبة الساعة فإنك سترى أن تسجيلها للوقت سيتوقف عندما تصل إلى أفق الحدث(*) ***event horizon***، مما يعني أنها لن تهبط **أبدًا** إلى أبعد من تلك النقطة.

وعلى أية حال، لن يكون باستطاعتك أن ترى شاشة الساعة وهي ثابتة في الزمن، بسبب الانزياح نحو اللون الأحمر للجاذبية. وسيستمر نفس الأثر الذي تسبب في تحول أرقام السّاعة من اللون الأزرق إلى اللون الأحمر، ولذلك فكلما هبطت الساعة أكثر كلما كان تردد الضوء المنبعث منها أقل فأقل. والضوء الذي له تردد أقل من تردد الضوء المرئي هو ما نسميه **الأشعة تحت الحمراء**، والضوء الأقل من ذلك يتسبب فيما نسميه **موجات الراديو**. وبالتالي، فإنك قد تتمكن من مراقبة الساعة لبعض الوقت بواسطة كاميرا للأشعة تحت الحمراء، وبعد ذلك عن طريق تلسكوب موجات الراديو، ولكن قبلما تصل الساعة إلى أفق الحدث، فإن الضوء المنبعث منها سيصبح أقل في التردد بحيث لا يستطيع التلسكوب التقاطها. وستختفي الساعة عن ناظريك حتى قبل أن تتحقق من أن زمنها على وشك التوقف.

الاندفاع المتهور إليه

ونعود إلى سفينة الفضاء، حيث ستكون مشغولا أنت وبقية الطاقم في مناقشة ما قد رأيته، وعندما يستبد الفضول بأحد أفراد الطاقم فإنه سينحي العقل جانبًا. سينسحب بعيدًا عن النقاش، ويرتدى على عجل بدلته الفضائية، ويأخذ الساعة الأخرى ويقفز إلى الخارج من سدادة الهواء في مسار يتجه فيه مباشرة إلى الثقب الأسود. يهبط إلى أسفل والساعة في يده. (ولأسباب سنذكرها بعد قليل، فإنه

(*) هو حد في الزمكان يختفي وراءه الحدث، وهو يُعرف بـ"نقطة اللا عودة" بمعنى: النقطة التي تكون عندها قوة الجاذبية شديدة جدًا لدرجة تجعل الهروب منها مستحيلا. (المترجم).

سيموت قبل أن يصل إلى الثقب الأسود بوقت طويل. ولكن دعونا نتجاهل ذلك حاليًا، ونتخيل أن بمقدوره القيام بملاحظاته قبل أن يسقط). سيراقب الساعة بينما يهبط، ونظرًا لأنه يسافر والساعة معه فإن الزمن بالنسبة له سيبدو وكأنه يجري جريانًا عاديًا، وستظل أرقام الساعة زرقاء. ويعني ذلك، أنه على الرغم من أنك قد لاحظت بأن الساعة تبطئ وتصبح أرقامها حمراء، فإنه لن يلاحظ أي شيء غير عادي حول هذا الموضوع. وسيلاحظ شيئًا غريبًا فقط عندما ينظر إلى الخلف إلى سفينة الفضاء. إذا كان بمقدوره مثلاً، تشغيل صاروخ المحرك الموجود ببدلته الفضائية بقدرة لحظية كافية للحد من هبوطه ثم أخذ يتطلع إلى الخلف[1]، سيرى أن وقتك يمضي **سريعًا**، وأن الضوء عندك ينزاح إلى اللون **الأزرق**، على عكس ما تراه أنت يحدث بالنسبة له. وعندما ينفذ وقوده، فإن جاذبية الثقب الأسود الهائلة ستسترجع تسارعه نحوها على الفور. وفي الحقيقة، ولأن قوة الجاذبية تزداد كلما اقتربت من جسم كتلته ضخمة، فإن تسارع زميلك سيصير أكبر كلما اتجه هابطًا نحو الثقب الأسود، مما يعني أن معدل سرعته سيزيد بنسبة هائلة ومتزايدة على حد سواء. وفي جزء من الثانية، سيسقط إلى ما بعد أفق الحدث، ليصبح الإنسان الأول الوحيد الذي هبط إلى داخل ثقب أسود.

وربما تتساءل حول ما يراه عندما يصبح فوق الثقب الأسود، ولكن لا تحبس أنفاسك في انتظار ظهور تقرير منه. وتذكر أنه من وجهة نظرك على السفينة الفضائية، فإنه لن يستطيع أبدًا عبور أفق الحدث. وسترى أن الزمن يتوقف لديه

---

(١) لقد قمت بجعل زميلك يتوقف لحظيًا أثناء هبوطه وينظر إلى الوراء حتى يمكنك أن ترى التماثل في الوضع: لتلاحظ أن الوقت عنده يمر بطيئًا والضوء لديه ينزاح إلى اللون الأحمر، بينما يلاحظ هو أن وقتك يمضي سريعًا والضوء عندك ينزاح إلى اللون الأزرق. وفي كل الأوقات الأخرى، أثناء هبوطه، سيرى الضوء لديك منزاحًا إلى اللون الأحمر بسبب سرعته العالية التي يبتعد بها عنك.

عندما يختفي عن ناظريك بسبب انزياح الضوء إلى اللون الأحمر. ويقودنا هذا إلى الحديث عن بعض الأخبار الجيدة والأخبار السيئة.

الأخبار الجيدة هي إنك عندما تعود إلى الأرض، يمكنك تشغيل فيديو أمام القضاء أثناء محاكمتك، يثبت أن زميلك ما زال خارج الثقب الأسود. وسيكون من الصعب عليهم إدانتك بالاشتراك في جريمة سقوطه إلى الثقب الأسود إذا كان لم يصل إليه تمامًا. والأخبار السيئة هي أنه على الرغم من أن زميلك ما زال خارج الثقب الأسود، فإنه ميت. وسيكون موته شنيعًا تمامًا (ولكن سريع)، بسبب التأثير الجانبي الذي لا يمكن تفاديه عند الاقتراب من الثقب الأسود. ويحدث هذا التأثير الجانبي للسبب نفسه الذي يؤدي إلى المد والجزر على الأرض.

ينتج المد والجزر أساسًا، بتأثير جاذبية القمر وتعني حقيقة أن قطر كوكبنا ١٣٠٠٠ كيلومترًا تقريبًا، أن أي جانب يواجه القمر في أية لحظة معينة يكون أقرب إليه من الجانب الآخر بمقدار ١٣٠٠٠ كيلومتر. وحيث إن قوة الجاذبية تعتمد على المسافة، فإن القمر يشد الأجزاء القريبة منه بقوة جاذبية أكبر. وهذا الاختلاف في شدة جاذبية القمر على الأجزاء المختلفة لكوكبنا يتسبب بشكل فاعل في "قوة تمدد" تجعل الكوكب يتمدد قليلا على طول خط الأفق للقمر وينضغط قليلا على طول الخط العمودي على ذلك. ويمكنك أن ترى تأثيرًا مماثلا عن طريق سحب طرفي شريط مطاطي في نفس الاتجاه (مثلما تشد جاذبية القمر كل أجزاء الأرض في نفس الاتجاه). ولكن بأن تشد جانبًا واحدًا أكثر من الآخر (مثلما تشد الجاذبية أكثر الجانب المواجه للقمر). سيتمدد الشريط المطاطي في الطول ويتقلص في العرض، على أن حركة كلا الطرفين ستكون في نفس الاتجاه.

وشد المد والجزر الناتج عن جاذبية القمر يؤثر على مجمل كوكبنا، بما في ذلك الأراضي والمحيطات، من الداخل والخارج. ومع ذلك، فإن صلابة الصخور

تجعل الأراضي ترتفع وتنخفض مع المد والجزر ولكن بمقدار أقل بكثير من المحيطات، وهذا هو السبب في أننا نلاحظ المد والجزر فقط في المحيطات. ويفسر هذا الشد أيضًا السبب عمومًا في وجود **مدين وجزرين** كل يوم: لأن الأرض تتمدد مثل الشريط المطاطي تمامًا، فيتم سحب المياه في المحيطات على كلا الجانبين، الجانب الذي يواجه القمر والجانب البعيد عنه. وعندما تدور الأرض فإننا نستكمل خلال دورتها الارتفاع والانخفاض الناتجين عن المد والجزر كل يوم، وعليه يكون لدينا مَدان عندما يحدث هذان السحبان وجزران فيما بينهما.

وبصورة أعم، فإن **قوة المد** والجزر هي ببساطة الفرق بين شد الجاذبية على أحد جوانب الجسم والسحب من الجانب الآخر. وتعتمد قوة المد والجزر لذلك على أمرين: (١) عرض الجسم و(٢) قوة الجاذبية التي تؤثر عليه. ويفسر الأمر الأول السبب في أن قوة المد والجزر ليس لها تأثير على أجسامنا على الرغم من تأثيرها الملحوظ على الكوكب: فالمسافة بين رؤوسنا وأصابعنا تكون صغيرة جدًا ولا تنتج عنها قوة شد لها قيمة من جاذبية القمر الضعيفة نسبيًا. ولكنك إذا اقتربت بما فيه الكفاية من ثقب أسود فإن جاذبيته الهائلة ستنتج عنها قوة تزيد عدة تريليونات على جاذبية القمر، ومع أن المسافة قصيرة بين رأس زميلك وأصابع قدميه – أو المسافة عبر خصره إذا ما انحرف جانبًا – فإنه سيشعر بقوة شد هائلة جدًا وسيتمزق إلى أشلاء. وللأسف، فإن دمه وأحشاءه هم من سيطّلع على الثقب الأسود.

وربما تتساءل حول ما إذا كانت هناك طريقة يستطيع بها الإنسان أن يتجنب هذا الموت الشنيع، ويكتشف ما هو موجود داخل ثقب أسود. والإجابة على الأرجح لا، بالنسبة للثقوب السوداء التي هي بقايا نجوم مثل الذي زرناه للتو. لأنه لا توجد أية طريقة عملية للتصدي لقوة المد. ومع ذلك، فإنه يمكنك من حيث المبدأ أن تبقى حيًا إذا سقطت في أفق الحدث الخاص بثقب أسود له كتلة هائلة. وعلى الرغم من

أنك لن تستطيع الهروب من أفق الحدث الخاص بثقب أسود كتلته هائلة أو أي ثقب أسود أقل في كتلته، فإن الحجم الأكبر لجسم كتلته هائلة سيجعل قوى المد *tidal force* الخاصة بالثقب الأسود ضعيفة جدًا عند أفق الحدث. وعندها ربما تستطيع الحياة لوقت قصير على الأقل، لتطلع على ما بداخل الثقب الأسود.

ومن الشيق أن تتساءل عما ستراه. عليك أن تضع في اعتبارك أنه من زاوية رؤية الموجودين خارج الثقب الأسود، بما في ذلك جميع الموجودين على الأرض، فإنك ستسقط إلى **اللا نهاية** داخل الثقب الأسود. ولن يكون لدينا أي سبب لانتظار ذهابك وعودتك إلينا بالأخبار، لأنك لن تصل أبدًا. ومن زاوية رؤيتك أنت، فإنك ستسقط في الثقب الأسود بسرعة عالية جدًا. ومن حيث المبدأ، وطبقًا لحقيقة الوضع، فإنه سيمر وقت كبير على الأرض بينما أنت تقترب من أفق الحدث، وبالتالي قد يتبادر إلى ذهنك أنه يمكنك مشاهدة ما سيحدث في المستقبل على الأرض عندما تنظر إليها أثناء عبورك نقطة الحدث. وللأسف، لن يكون هذا هو الحال، ويعود ذلك إلى الطريقة التي يتشوه بها الضوء القادم من الأرض بسبب كل من سرعتك وجاذبية الثقب الأسود. ولكن حتى لو لم يتشوه الضوء، وكنت لا تزال قادرًا على رؤية مستقبل البورصة فإنك لن تستطيع العودة إلى الأرض لتستثمر فيها، لأنه بقدر ما نعلم، لا يوجد هروب من الثقب الأسود. إن أفق الحدث هو النقطة التي تصبح عندها السرعة المطلوبة لمغادرة محيط الثقب الأسود (سرعة الهروب) هي سرعة الضوء، ولأن أينشتاين قد أخبرنا أنه لا يمكن لأي جسم مادي أن يصل إلى هذه السرعة، فإن أي جسم لن يستطيع الهروب من أفق الحدث. ومن المفترض أنك ستستمر ببساطة في السقوط نحو مركز الثقب الأسود، أو نقطة **التفرد**(*) *singularity*، وستلقى مصيرك المتعلق بتأثير المد *tidal force* في وقت ما قبل أن تصل.

(*) التفرد: نقطة أو منطقة في الثقب الأسود يقال نظريًا بأن قوة الجاذبية تضغط على الجسم حتى تجعل كثافته لا نهائية وحجمه لا متناه في الصغر. (المترجم).

ربما تقول لي، انتظر، فإن كتّاب قصص الخيال العلمي يقولون بأنك قد تجد وسيلة للبقاء على قيد الحياة خلال رحلتك لعبور الثقب الأسود، وربما تستطيع أن تستخدم الثقب الأسود كـ"ثقب دودي *wormhole*" للسفر بين نقطتين متباعدتين في الكون. إنها فكرة لطيفة، ولكن الكلمة المفتاحية هنا هي كلمة "ربما". وعلى الرغم من أنه ليس هناك أي شيء في القوانين المعروفة للفيزياء يمنع هذه الفكرة[١]، فإنه لا يوجد أيضًا ما يقول بصحتها.

ويقودنا هذا إلى نقطة مهمة حول طبيعة العلم. العلم هو **أدلة**. ولا يعود السبب في أننا نستطيع وصف الآثار الغريبة بالنسبة للزمن التي واجهتك أثناء رحلتك إلى الثقب الأسود إلى اعتقاد رجل ذكّي يدعى أينشتاين بها. ولكن بسبب أن العلماء قد اختبروا بعناية التوقعات التي قام بها أينشتاين، وأن هذه الاختبارات قد أجريت في إطار مجموعة واسعة من الظروف. وعلى الرغم من أننا لم نملك بعد التكنولوجيا اللازمة لاختبار ظروف شديدة التطرف كمثل تلك التي في أفق الحدث، فإن كل الاختبارات التي أجريت إلى الآن تؤكد أنه كان على حق. ودون هذه الاختبارات، تعتبر أفكار أينشتاين مجرد تهيؤات.

ومن ناحية الجوهر، فإن الدليل هو الفرق بين العلم والخيال العلمي. الخيال العلمي حر في تخيل أي شيء لا ينتهك القوانين المعروفة (وفي بعض الأحيان، حتى الأمور التي تقوم بذلك) مما يترك المجال مفتوحًا أمام عدد لا نهائي من الاحتمالات. أما العلم فيقتصر على نطاق ضيق نسبيًا من الأفكار التي يمكننا حاليًا

(١) في الواقع، فإن الحسابات الرياضية الدقيقة للثقوب السوداء الدوارة تحتوي على ثقوب دودية بها اتجاه يتصل بـ"أكوان أخرى". ومع ذلك تشير هذه الحسابات أيضًا إلى أن هذه الثقوب الدودية غير مستقرة ولا يمكن استخدامها في السفر الفعلي.

اختبارها، أو استكشاف الأفكار التي نستطيع اختبارها في المستقبل. وعلى الرغم من وضوح هذا الاختلاف الأساسي بين العلم والخيال العلمي، فإنه غالبًا ما تنشأ حالة من اللبس على تخوم المعرفة الراهنة. انظر إلى الأفكار المتعلقة بدواخل الثقوب السوداء. بمقدور العلماء الاستعانة بالقوانين المعروفة للطبيعة للتنبؤ بما قد تكون عليه الأحوال بعد عبور أفق الحدث. ولقد قمت بذلك للتو، مفترضًا أنك ستستمر في السقوط في اتجاه منطقة التفرد بحيث تتحول إلى أشلاء بسبب قوى الجاذبية. وحيث إن هذه التوقعات تستند إلى أفكار تم اختبارها، فمن المستحسن افتراض وجوب صحتها. ومع ذلك، فإننا لا نعرف حتى الآن أية طريقة لاختبار توقعاتنا حول ما يحدث داخل الثقب الأسود، وتظل أكثر التوقعات التي تبدو راسخة مجرد تخمينات. وترتفع نسبة التخمين أكثر بالنسبة للأفكار المتعلقة بالسفر بسرعة أكبر من سرعة الضوء، مثل الفضاء متعدد الأبعاد، والثقوب الدودية والسفر بمحرك الاعوجاج. وقد يمكن البرهنة على صحة أي من هذه الأفكار في يوم ما، ولكنها ستظل أفكارًا تخص الخيال العلمي أكثر مما تخص العلم إلى أن نستطيع اختبارها.

وسنقوم في هذا الكتاب بالتركيز على العلم القائم على الدليل فيما يتعلق بأفكار أينشتاين. وسنبقى بعيدًا عن قصص الخيال العلمي والاستنباط الرياضي باستثناء الحديث باختصار عن بعض الأفكار التي قد تكون سمعت عنها. وسيجعل هذا النهج المرتبط بالأدلة هذا الكتاب مختلفًا بطريقة ما عن الكتب التي يلبي فيها المؤلفون عادة متطلبات السوق في الحديث بطريقة تقترب أكثر من التخيل للمناطق الفاصلة بين العلم وقصص الخيال العلمي. ويميز هذا النهج القائم على الأدلة في هذا الكتاب أن كل مقاربة فيه مبنية على العلم. وفي الحقيقة، فإن كثيرًا مما سنناقشه قد بات معروفًا للعلماء منذ أكثر من قرن من الزمان عندما نشر أينشتاين

الجزء الأول من نظريته عن النسبية في عام ١٩٠٥. ومع ذلك، فإن الأخبار القديمة ليست دائمًا أخبار مملة، وإذا كنت لم تقم بدراستها فيما مضى، فإنني أعتقد أنك ستجد أن أفكار أينشتاين لا تعصف فقط بالعقل، ولكنها أيضًا على درجة من **الأهمية**، بمعنى أنها ستغير الطريقة التي تنظر بها إلى الكون.

الجـــزء الثانى

نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين

(٢)

التسابق مع الضوء

مع أننا كثيرًا ما نتكلم عن **الـ** نظرية النسبية، فإن أينشتاين في الحقيقة قد نشر هذه النظرية في جزأين منفصلين. الجزء الأول والمعروف **بنظرية النسبية الخاصة** ونشر في عام ١٩٠٥. وهذه النظرية هي التي تفسر تباطؤ الزمن الذي جعل عمرك أصغر من أولئك الذين ظلوا بمكانهم على الأرض أثناء رحلتك إلى الثقب الأسود. وهي أيضًا النظرية التي تخبرنا بأنه لا يوجد شيء يمكنه أن يسافر بسرعة أكبر من سرعة الضوء، ومنها اكتشف أينشتاين معادلته الشهيرة: الطاقة = الكتلة x مربع سرعة الضوء ($E = mc^2$). وربما تقول، "حسنًا، إنها خاصة إلى حد ما، ولكن أليس من الغريب أن يقترن اسمها بكلمة **خاصة؟**" والإجابة، نعم قد يكون ذلك غريبًا. والسبب الحقيقي في وضع كلمة **خاصة** هو تمييز هذه النظرية عن نظرية أخرى نشرها أينشتاين بعد عقد من الزمان، والتي نسميها **النظرية النسبية العامة**.

وكما يتضمن الاسمان، فإن النظرية النسبية الخاصة هي أساسًا مجموعة جزئية من النظرية العامة. وعلى وجه الخصوص، تنطبق النظرية النسبية الخاصة على حالة خاصة فقط، يتم فيها تجاهل أية تأثيرات للجاذبية، بينما تتضمن النظرية العامة موضوع الجاذبية. وبالتالي فإن النظرية العامة هي التي تفسر ملاحظاتك الخاصة عن الجاذبية القوية للثقب الأسود، وهي أيضًا النظرية التي نستطيع من خلالها فهم بنية الكون ككل، بما في ذلك التمدد الملحوظ له.

وللسبب نفسه، وضع أينشتاين النظرية الخاصة قبل العامة، فمن السهل التعرف على نظرية النسبية بدءًا من حالة خاصة. وسنمضي نحن كذلك، ونبدأ بالطريقة نفسها، بواحدة من أشهر قضايا النظرية الخاصة.

إنه قانون

ربما رأيت قمصانًا عليها كتابة تقول: "٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية": إنها ليست مجرد فكرة لطيفة، إنه قانون!". وهي جملة محببة تمامًا بين الفيزيائيين الطموحين، وذلك على الرغم من أن المعنى التي تحمله هذه الفكرة هو من أقل المعاني التي تعود إلى نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين في شعبيتها. والسبب واضح في عدم شعبية هذه الفكرة: فلا أحد يرغب في إخباره بما لا يقدر عليه. وعلى الرغم من ذلك، فقد استند أينشتاين في استحالة السفر بسرعة الضوء إلى أساس محكم من الأدلة لدرجة جعلت حتى كتّاب قصص الخيال العلمي يتجنبون عمومًا انتهاكه. والسفن الفضائية في قصص **جولة بين النجوم** و**حرب النجوم** لا تسافر في الحقيقة أبدًا بسرعات أكبر من سرعة الضوء، وبدلا من ذلك فإنها تقوم بطريقة ما بثني أو تشويه الفضاء (كما في قصة **جولة بين النجوم**) لتقريب النقاط البعيدة من بعضها، أو بترك الفضاء كله مؤقتا (كما في **حرب النجوم**) وبذلك تستطيع القفز خلال الفضاء المتعدد الأبعاد والظهور في موقع آخر. وحتى لو ثبت في يوم ما صحة وجود مثل هذه "الثغرات" في قوانين الطبيعة، فإنها لا تغير من حقيقة أساسية هي أنه لا يمكنك القفز إلى سفينة فضاء وتسريعها إلى سرعة أكبر من سرعة الضوء.

ولمَ لا؟ لقد سمع معظم الناس عن هذا القانون، ولكن معظمهم يفترض أيضًا أن هناك طريقة ما للالتفاف حوله. وعلاوة على ذلك، فإن هناك العديد من الحالات

في التاريخ التي قام فيها الناس بأفعال كان من المفترض أنها مستحيلة. وتتضمن الأمثلة الشهيرة، ادعاءات كبار العلماء في القرن العشرين باستحالة كسر حاجز الصوت، أو أن البشر لن يستطيعوا أبدًا الهبوط على سطح القمر. ولكن إذا كانت النسبية صحيحة – وتشير الأدلة بقوة إلى ذلك- فيجب أن يكون هناك إذن اختلاف يخص سرعة الضوء. والمسألة هي أن سرعة الضوء ليست حاجزًا لنكسره مثل سرعة الصوت، وليست تحديًا مثل الوصول إلى القمر. لقد كنا دائمًا نعلم بأن هناك أشياء تسافر أسرع من الصوت، وكنا نعلم دائمًا بأن هناك أجسامًا يمكن أن تصل إلى القمر. وكان السؤال المطروح هو إذا كنا **قادرين** على القيام بذلك.

ونظرًا للصعوبة الشديدة في تصديقك لهذا، فإنني سأبدأ في إطلاعك على الأستنتاج الذي سنحاول الوصول إليه في هذا الفصل: تخبرنا النسبية عند قيام أي شخص بقياس سرعة الضوء فإنه دائمًا سيجدها هي نفسها، ويؤدي هذا الاتفاق حول سرعة الضوء بصورة حتمية إلى حقيقة أنك لا يمكن أن تجتاز الضوء الذي ينبعث منك. وإذا كان الشخص لا يستطيع أن يسبق الضوء المنبعث منه فإن الآخرين سيرون دائمًا أنه يتحرك أبطأ من أي ضوء ينبعث منه أو ينعكس عنه. وبعبارة أخرى، فإن النسبية تخبرنا حقًا بأن سرعة الضوء هي خاصية أساسية في الطبيعة، لا تختلف كثيرًا في الطريقة نفسها عن حقيقة وجود القطب الشمالي كخاصية أساسية لدوران الكوكب. والسؤال حول كيفية السفر بسرعة أكبر من الضوء هو إلى حد ما شبيه بالسؤال بكيفية السير شمالا من القطب الشمالي (الذي تتجه منه **جميع** الاتجاهات إلى الجنوب). وهو سؤال لا معنى له أبدًا، إذا ما كان الشخص يفهم معنى قطب شماليّ أو معنى سرعة الضوء.

وقبل أن نستمر، هناك تحذيران مهمان ينبغي أن تكون على علم بهما. الأول، عندما نتكلم عن سرعة الضوء في النسبية فإننا نقصد سرعة الضوء الذي

يسافر خلال مساحة فارغة. هذه السرعة، التي هي ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية هي في الحقيقة السرعة القصوى للضوء؛ ويسافر الضوء بسرعة أبطأ عندما يمر من خلال مواد مثل الماء أو الهواء أو الزجاج، وفي السنوات الأخيرة استطاع العلماء أن يصلوا إلى طريقة لإبطاء سرعة الضوء إلى سرعات قليلة جدًا في المعمل. ومن الواضح، أنه يمكن تجاوز الضوء الذي يسافر بسرعة بطيئة على نحو غير عادي. وما لا يمكنك تجاوزه هو الضوء الذي ينتقل بحرية خلال الفضاء.

ويخص التحذير الثاني تلك العبارة الشائعة "لا شيء يمكنه السفر بسرعة أكبر من سرعة الضوء"، فليس هذا تمامًا ما تقوله النسبية في الحقيقة لنا، والتي من الأفضل تعديلها ونقول "**لا شيء بإمكانه أن يجتاز الضوء**"(١). ولنأخذ مثالا محددًا، يعتقد علم الفلك الحديث بوجود مجرات تقع على بعد مسافة مئات المليارات من السنين الضوئية عنا – أبعد من حدود **كوننا المرئي**، بمعنى ذلك الجزء من الكون الذي يمكن من حيث المبدأ رؤيته– والذي يبتعد عنا مع تمدد الكون *expansion of universe* بسرعات أسرع كثيرًا من سرعة الضوء. وهذا لا يجافي النظرية الخاصة للنسبية، لأن انفصال هذه المجرات عنا لا ينطوي على أي واحد (أو أي شيء) يسبق أي ضوء. وإذا حاولنا السفر إلى واحدة من هذه المجرات، فإننا لن نستطيع أبدًا أن نبلغها؛ فالضوء لن يستطيع اللحاق بها ولا نحن كذلك. والطريقة المتوازنة في التفكير حولها هي أن نقول إن استحالة السفر أسرع من الضوء

---

(١) في الواقع، تسمح النظرية النسبية، رياضيًا، لجزئيات تسمى تاكيونات *tachyons* بالسفر دائمًا بسرعة أكبر من الضوء؛ وعليه، فكما لا يمكننا أبدًا أن نسافر أسرع من الضوء، لا يمكن للتاكيونات أبدًا أن تسافر بسرعة أبطأ من الضوء. ويشك معظم الفيزيائيين في حقيقة وجود تلك التاكيونات، حتى لو كان الأمر كذلك، فإنه لا يغير من حقيقة أنه عندما يبدأ شيء في السير بسرعة أبطأ من سرعة الضوء، فإنه لا يمكن أبدًا تعجيل سرعته إلى نقطة يتجاوز فيها سرعة الضوء.

تنطبق فقط على القدرة على نقل المادة أو المعلومة من مكان إلى آخر، أو القول بأن لا شيء يمكنه السفر **عبر الفضاء** بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وما نقوله الآن هو ما تذكره معظم النصوص التي تتناول النسبية، ومع ذلك فإنني أجد أنه من الأسهل القول إن "لا شيء يستطيع أن يجتاز الضوء".

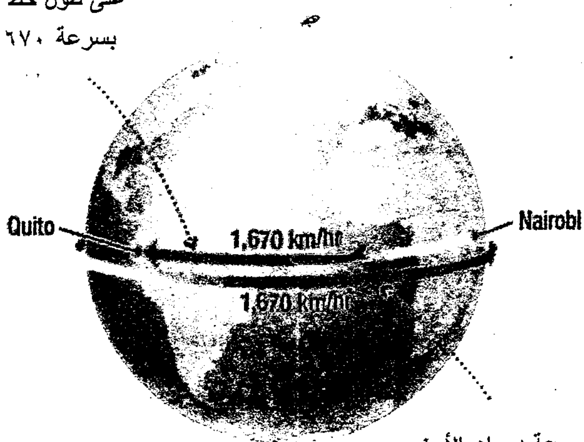
ما النسبي في النسبية؟

الخطوة الأولى في فهم النسبية هي أن نوضح بالضبط ما هو نسبي. وعلى العكس من الاعتقاد الشائع، فإن نظرية أينشتاين لا تقول لنا إن "كل شيء نسبي". وبالأحرى، فإن نظرية النسبية الخاصة تنتسب إلى فكرة أن **الحركة** دائمًا نسبية.

ربما تبدو فكرة أن الحركة نسبية غير بدهية. وعلاوة على ذلك، فإنك إذا رأيت سيارة على الطريق السريع أو طائرة تمتطي عناء السماء، فقد يبدو لك واضحًا أن السيارة أو الطائرة تتحركان، بينما أنت ثابت على الأرض. ولكن الأمر في الحقيقة ليس بهذا الوضوح التام كما يبدو. وحتى تفهم السبب، تخيل أن هناك طائرة أسرع من الصوت تحلق من نيروبي في كينيا إلى كيتو في الإكوادور، بسرعة ١٦٧٠ كيلومترًا في الساعة (نحو ١٠٤٠ ميلا في الساعة). وعليك أن تجيب الآن عن هذا السؤال: ما سرعة تحليق الطائرة؟

في البداية، يبدو هذا السؤال تافهًا، حيث إنني قد أخبرتك للتو أن الطائرة تحلق بسرعة ١٦٧٠ كيلومترًا في الساعة. ولكن لتتريث. إن نيروبي وكيتو موجودتان على خط استواء الأرض، وسرعة دوران الأرض عند خط الاستواء هي ١٦٧٠ كيلومترًا في الساعة، ولكن في الاتجاه المعاكس (شكل ٢-١). لذلك فإنك إذا كنت تنظر إلى تحليق الطائرة من فوق سطح القمر، فإنها ستبدو لك ساكنة في وضعها بينما الأرض هي التي تتحرك من تحتها. وعندما يبدأ تحليق الطائرة

سترى أن الطائرة ترتفع على الأرض في نيروبي. وستظل الطائرة ساكنة بينما تدور الأرض وتبعد مدينة نيروبي عنها وتقرب مدينة كيتو لها. وعندما تصل كيتو تمامًا إلى موقع الطائرة فإنها ستهبط إلى الأرض.



شكل (٢-١)

تخيل طائرة أسرع من الصوت تحلق غربًا من نيروبي إلى كيتو بسرعة ١٦٧٠ كيلومترًا في الساعة. وهذه السرعة تناظر تمامًا سرعة دوران الأرض عند خط الاستواء، والتي تكون في الاتجاه المضاد. ما هي إذن سرعة طيران الطائرة بالفعل؟

إذن، ماذا يحدث للطائرة **بالفعل**؟ هل هي تطير بسرعة ١٦٧٠ كيلومترًا في الساعة، أو تظل ساكنة (سرعتها صفر) بينما تدور الأرض تحتها؟ طبقًا لنظرية النسبية لا توجد إجابة مطلقة لهذا السؤال. يمكنك وصف الحركة فقط إذا قمت

بنسبتها إلى شيء آخر. وبعبارة أخرى، يمكنك أن تقول وأنت على حق إن "الطائرة تتحرك بالنسبة لسطح الأرض بسرعة ١٦٧٠ كيلومترًا في الساعة"، وأن تقول وأنت صادق "عند النظر من القمر، إن الطائرة تبدو ساكنة بينما تدور الأرض تحتها". وفي كلتا الحالتين فإن أية وجهة نظر منهما ليست أدق أو أقل دقة من وجهة النظر الأخرى.

وفي الحقيقة، فإن هناك وجهات نظر أخرى متساوية الدقة بالنسبة لطيران الطائرة. فالشاهد الذي ينظر إلى النظام الشمسي من نجم آخر سيرى أن الطائرة تحلق بسرعة ١٠٠٠٠٠ كيلومتر في الساعة، لأن هذا هو سرعة دوران الأرض في مدارها حول الشمس. والشاهد الذي يعيش في مجرة أخرى سيرى الطائرة تتحرك مع مجرة درب التبانة بسرعة ٨٠٠٠٠٠ كيلومتر في الساعة تقريبًا.

وبلغة النظرية النسبية فإننا نقول بأن أي وصف لحركة الطائرة يعتمد على **الإطار المرجعي** *frame of reference* للمشاهد. فكل من وجهات النظر المختلفة لحركة الطائرة – مثل وجهة نظر الشاهد من على سطح الأرض، أو من القمر، أو من نجم آخر أو من مجرة أخرى– تمثل نقاطًا مرجعية مختلفة. وبصورة أكثر عمومية، فإننا نقول إن شيئين أو (شخصين) يتشاركان في نفس النقطة المرجعية إذا كان كلاهما ثابتًا بالنسبة للآخر.

الثوابت في النظرية النسبية

إن اسم "نظرية النسبية" هو اسم مناسب بمعنى ما، حيث إن نسبية الحركة هي جزء أساسي في هذه النظرية. ولكنه اسم خاطئ من زاوية أخرى، لأن أسس هذه النظرية ترتكز في الحقيقة على فكرة أن هناك أمرين متميزين وثابتين في الكون:

١- إن قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة للجميع.

٢- إن سرعة الضوء هي نفسها بالنسبة للجميع.

وكل فكرة مذهلة تفتقت عنها نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين -بما في ذلك الطرق الغريبة التي أصبح بها الزمان والمكان مختلفين خلال رحلتك إلى الثقب الأسود عن حالهما عند الناس على الأرض- تعود مباشرة على ما يبدو إلى هذين الثابتين المحايدين. ولذلك السبب، دعونا نستكشف باختصار ما يعنيه هذان الثابتان حقًا.

الثابت الأول، أن قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة للجميع، ربما لا يكون غريبًا. ففي الواقع، أن هذه الفكرة تسبق أينشتاين بعدة قرون، وتعود إلى جاليليو. وعلى سبيل المثال، فإن هذه الفكرة تفسر السبب في أنك لا تشعر بالحركة عندما تسافر في طائرة عندما تكون حركة الطائرة على نحو سلس. وفي هذه الحالة، فإن الاختلاف الوحيد بين نقطتك المرجعية من على الطائرة وأية نقطة مرجعية على الأرض هي حركتك النسبية فوق الأرض. وطالما أن الحركة سرعتها ثابتة فإنك لن تشعر بأية مؤثرات تختلف عن تلك الموجودة على الأرض، وتستطيع إجراء إحدى التجارب على متن الطائرة وتحصل على النتائج نفسها التي تحصل عليها إذا قمت بتلك التجارب في معمل على سطح الأرض. وتعني حقيقة أنك ستحصل على النتائج نفسها أنك ستتوصل بالضبط إلى نفس الاستنتاجات حول قوانين الطبيعة.

والثابت الثاني، أن سرعة الضوء هي نفسها بالنسبة للجميع، أكثر إثارة للدهشة. فنحن عمومًا نتوقع من الناس في أطر مرجعية مختلفة أن تعطينا إجابات مختلفة حول سرعة الشيء الذي يتحرك. على سبيل المثال، افترض أنك في طائرة تحلق بالنسبة للأرض بسرعة ٨٠٠ كيلومتر في الساعة. إذا قمت بدحرجة كرة في ممر الطائرة في اتجاه مقدمة الطائرة فإنك ستقول إن الكرة تتحرك ببطء إلى حد ما. وبالمقابل، فإن الأشخاص الموجودين على الأرض سيقولون إن الكرة تتحرك

بالنسبة لهم بسرعة شديدة، لأنهم سيرونها تتحرك بالسرعة التي دحرجتها بها **بالإضافة** إلى سرعة الطائرة ٨٠٠ كيلومتر في الساعة.

والآن، لنفترض بدلا من دحرجة الكرة، أنك أضأت مصباحًا. فبنفس المنطق الذي طبقناه على الكرة فإنك ستتوقع أن الشخص الموجود على الأرض سيقول إن شعاع المصباح يسافر بسرعة تزيد بـ ٨٠٠ كيلومتر في الساعة عما ستقوله أنت عن سرعته وأنت داخل الطائرة. **ولكن الحال ليس كذلك**، لأن الثابت الثاني للنظرية النسبية يقول إن الجميع يقيسون دائمًا نفس السرعة للضوء. ولا يهم كيف ستقيسها فإنك والناس الموجودين على الأرض ستقولون إن شعاع الضوء يسافر بنفس السرعة **بالضبط**؛ وهذه السرعة ستكون بالطبع سرعة الضوء أو ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية.

إن ثبات سرعة الضوء هو أمر مذهل تمامًا لدرجة أننا يجب أن نأخذ بعض الوقت لتوضيح سبب أهميته الشديدة. وكما قلت سابقًا، فإن كل النتائج المذهلة لنظرية النسبية الخاصة تعود مباشرة إلى هذين الثابتين. وإذا سلمنا بأن الثابت الأول ليس مذهلا لأننا خبرناه منذ وقت طويل، فإن كل النتائج المتعلقة بالنسبية تنبع في جوهرها من فكرة وحيدة مذهلة هي أن الجميع يقيسون دائمًا نفس السرعة للضوء. وبعبارة أخرى، إذا كانت هذه الفكرة صحيحة فإن كل نظرية النسبية ستبدو على خير ما يرام. وعلى العكس، إذا لم تكن صحيحة، فإن هذه النظرية برمتها ستتهاوى.

ما الذي يجعلنا إذن واثقين جدًا أن أينشتاين كان على حق؟ تذكر، أن الملاحظات والتجارب هما الحكام النهائيون على الحقيقة في العلم، **وثبات سرعة الضوء هي حقيقة أكدتها التجربة**. وقد جاء أول برهان واضح لهذه الحقيقة من تجربة أجرياها في عام ١٨٨٧ إيه. إيه. ميكيلسون وإي. دبليو. مورلي. وفي

تجربتهما المعروفة الآن باسم **تجربة ميكيلسون – مورلي**، اكتشفا أن سرعة الضوء لا تتأثر بحركة الأرض حول الشمس. وباستطاعتنا اليوم أن نقيس ثبات سرعة الضوء بطرق عديدة أخرى. وإذا أخذنا مثالا بسيطًا وشاملاً، فإن كل نجم وكل مجرة في السماء يتحرك بالنسبة إلى الأرض بسرعة مختلفة. بعض المجرات البعيدة تبتعد عن الأرض بسرعة تقترب من سرعة الضوء. ومع ذلك إذا قست سرعة الضوء القادم من أي من هذه الأجسام، فإنك ستجد أنها ستكون دائمًا نفس السرعة ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية مثل سرعته عندما تقيسها بالنسبة للضوء المنبعث من الأرض. ولا توجد ببساطة أية طريقة للالتفاف حول ذلك: فقد بينت التجارب أنك دائمًا ستقيس نفس سرعة الضوء (في الفراغ)، بغض النظر عن حركتك بالنسبة لمصدر الضوء.

التجارب الذهنية عند سرعات منخفضة

ومسايرة لما فعله تقريبًا أينشتاين، فإننا يمكننا الآن بناء النظرية النسبية الخاصة من خلال الانخراط في سلسلة من **التجارب الذهنية**، التي سنفكر خلالها في تجارب لن نقوم بإجرائها فعليًا، ولكن في مقدورنا القيام بها من حيث المبدأ. ولنضع في اعتبارنا أنه في حين أن التجارب الذهنية حاسمة في مساعدتنا على فهم وتوقع النتائج المترتبة على النظرية، فإنها في حد ذاتها لا تشكل دليلا عليها. ونحن نعتبر أن التجارب الذهنية صحيحة فقط لأن التجارب الحقيقية (التي سنناقشها لاحقًا) قد أكدت كل الاستنتاجات التي سنقوم بها عن طريق الفكر.

انطوت تجارب أينشتاين الذهنية غالبًا على التفكير في حركة القطارات. ومع ذلك، ولسببين هما: أن الحركة النسبية يمكن تخيلها بصورة أسهل في الفضاء، وأن النظرية النسبية الخاصة تهمل دور الجاذبية، فإننا سنقوم بتجاربنا الذهنية على سفن فضائية. وسنفترض أن سفننا الفضائية محركاتها مطفأة، بحيث يكون كل

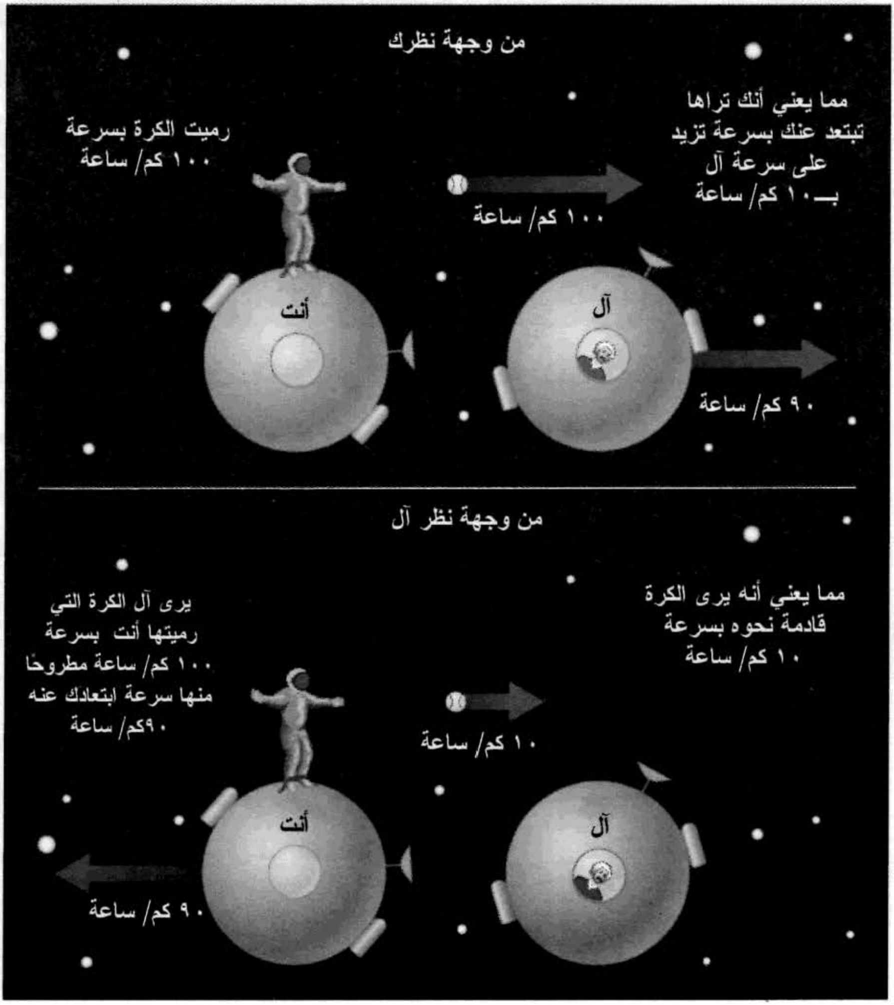
شيء بداخلها عديم الوزن ويعوم دون قيد. ولهذا السبب فإننا نسمي تلك الأطر المرجعية المتعلقة بهذه السفن الفضائية **أطر عائمة حرة** ***free-float frames*** (وتسمى أحيانًا أطر مرجعية قصورية ***inertial***). وفي حالة ما إذا كنت تتساءل عن **السبب** في جعلك عديم الوزن في سفينة فضائية محركاتها مطفأة، فإليك الرد البسيط على ذلك: إن مفاهيم مثل فوق وتحت يكون لها معنى فقط بالنسبة لسطح كوكب (أو أي جسم آخر). ولا توجد أطر مرجعية للأعلى والأسفل عندما تكون في عمق الفضاء، ولذلك فما دام أن محركاتك مطفأة، فإنه لا يوجد أي مبرر للحركة في أي اتجاه معين، مما يعني أن مركبتك الفضائية ستعوم في الفضاء في حالة من انعدام الوزن.

وحتى تتأكد من كيفية سير التجارب الذهنية، دعنا نبدأ بشيء ما فيه أن المركبات الفضائية والأجسام الأخرى تتحرك بسرعة منخفضة بالنسبة إلى بعضها بعضًا. تخيل أنك في الفضاء تعوم دون قيد في مركبتك الفضائية. وبسبب عدم شعورك بأية تأثيرات من أية نوع فمن الطبيعي أن تعتبر نفسك ساكنًا (لا تتحرك). وعندما تنظر من نافذتك ترى صديقك آل يعوم داخل مركبته الفضائية التي تتحرك إلى يمينك بسرعة كانت عند قياسك لها ٩٠ كيلومترًا في الساعة. فما قول آل فيما يحدث؟

ومثلك تمامًا، لا يشعر آل بأية تأثير لأنه يعوم دون قيد في مركبته الفضائية، ولذلك سيقول **إنه** ساكن و**إنك** تتحرك (إلى يساره) بسرعة ٩٠ كيلومترًا في الساعة. وعلى أية حال فإن هذا طبيعي لأن أية حركة نسبية، ووجهة نظرك ووجهة نظر آل تتساويان في الصحة.

دعنا نضيف بعض التعديل البسيط في التجربة الذهنية. بينما يمضي آل في حال سبيله، ارتديت على عجل بدلتك الفضائية وقمت بتثبيت قدميك في السطح الخارجي لمركبتك الفضائية (حتى لا تسبح بعيدًا)، ورميت كرة بيسبول في اتجاهه

بسرعة ١٠٠ كيلومتر في الساعة. فما قول آل فيما يخص كرة البيسبول؟ سيعتبر أنه ما زال ساكنًا وأنك تبتعد عنه بسرعة ٩٠ كيلومترًا في الساعة. ولذلك، كما هو موضح في شكل(٢-٢) سيرى أن كرة البيسبول تتحرك نحوه بسرعة ١٠ كيلومترات في الساعة فقط.



شكل(٢ ـ ٢)

بالنسبة لك، أنت ترى أنك ساكن، بينما يتحرك آل إلى يمينك بسرعة ٩٠ كيلومترًا في الساعة، والكرة تتحرك في اتجاهه بسرعة ١٠٠ كيلومتر في الساعة. وبالنسبة لـ"آل" فإنه يرى بأنه ساكن، وأنك تتحرك مبتعدًا عنه بسرعة ٩٠ كيلومترًا في الساعة، والكرة قادمة نحوه بسرعة ١٠ كيلومترات في الساعة

وستحصل على نتيجة أكثر تشويقًا إذا تخيلت أنك رميت الكرة نحوه بسرعة ٩٠ كيلومترًا في الساعة. وحيث إنها تماثل تمامًا السرعة التي يرى أنك تبتعد بها عنه، فإن الكرة في هذه الحالة ستكون ساكنة بالنسبة لإطاره المرجعي. فكر للحظة: قبل أن ترمي كرة البيسبول، كان آل يراها مبتعدة عنه بسرعة ٩٠ كيلومترًا لأنها كانت في يدك. وفي اللحظة التي رميت فيها الكرة، فإنها أصبحت ساكنة في إطار آل المرجعي، عائمة في الفضاء على بعد مسافة ثابتة من سفينته الفضائية. وبعد عدة ساعات، بعدما تكون قد رحلت بعيدًا، فإن آل سيرى الكرة عائمة في مكانها نفسه. ولو كان يرغب، فإن بمقدوره أن يرتدي بدلته الفضائية ويخرج لاسترجاعها، أو باستطاعته أن يتركها في مكانها. فمن وجهة نظره المرجعية، لن تمضي الكرة إلى أي مكان وكذلك هو.

التجارب الذهنية عند سرعات عالية

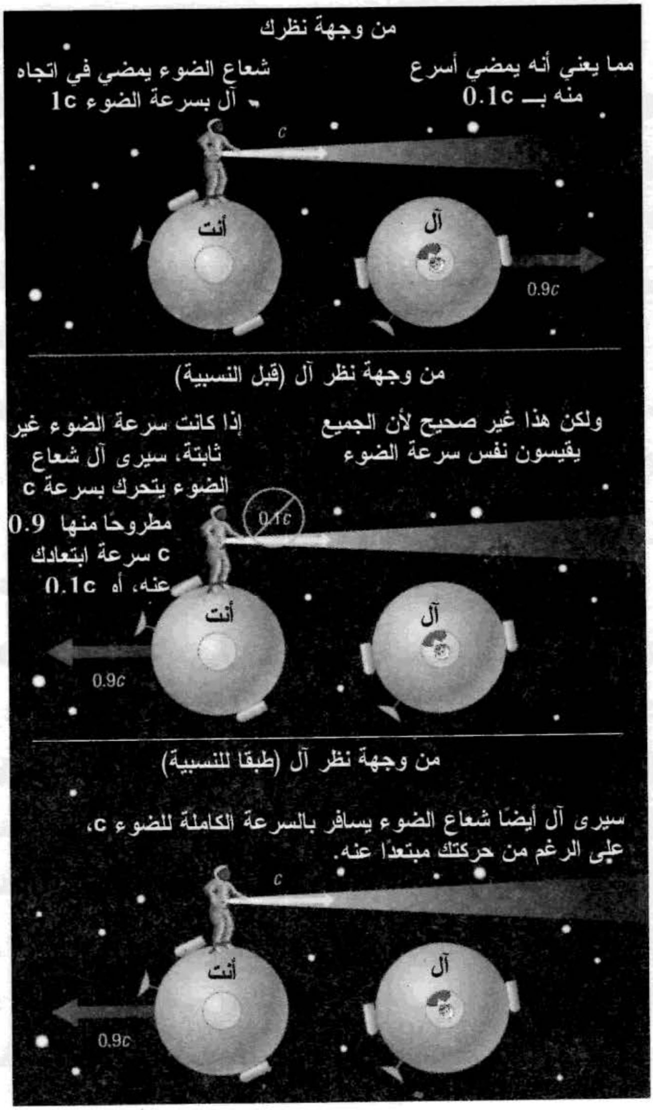
لم نقم بعد بفحص ثبات سرعة الضوء في تجاربنا الذهنية، لأن السرعات التي تكلمنا عنها قليلة جدًا بالنسبة لسرعة الضوء. وعلى سبيل المثال، فلو أمعنت النظر ستجد أن سرعة ١٠٠ كيلومتر في الساعة لكرة البيسبول هي أقل من **واحد على عشرة ملايين من سرعة الضوء**. وربما تخمن أن الأمور ستختلف قليلا عندما نزيد سرعة السفينة الفضائية.

تخيل أن آل يتحرك الآن إلى يمينك بسرعة هي ٩٠% من سرعة الضوء، أو $0.9\ c$. (تذكر أن c هو الرمز الذي يشير إلى سرعة الضوء). وكما هو الحال من قبل، سيدعي كل منكما وهو محق أنه ساكن. ولذلك، بينما تقول إن آل يتحرك إلى يمينك بسرعة $0.9\ c$ سيقول هو إنه ثابت بينما أنت الذي تتحرك إلى يساره بسرعة $0.9\ c$.

ولأنك تعتبر نفسك ساكنًا وتسبح دون قيد في سفينتك، فإنه ما زال سهلا بالنسبة لك أن ترتدي بدلتك الفضائية وتثبت قدميك على سطح السفينة. وفي هذه المرة بدلا من أن تأخذ كرة بيسبول ستأخذ مصباحًا. وستوجهه نحو آل ثم تضيئه. كيف سيصف كلاكما الموقف؟

من وجهة نظرك الأمر سهل. آل يتحرك إلى يمينك بسرعة $0.9\ c$ بينما شعاع الضوء يذهب في اتجاهه بكامل سرعة الضوء، c. ولذلك ستقول إن شعاع الضوء يتحرك بسرعة تزيد على سرعة آل بمقدار $0.1\ c$ مما يعني أنها ستصل إليه تدريجيًا ثم تجتازه.

وعندما تتحول إلى وجهة نظر آل، فستقوم بتطبيق نفس النظام العقلي السابق على النسبية الذي استخدمته مع كرة البيسبول، وتتوقع أنه سيقول إن الضوء يتحرك في اتجاهه بسرعة $0.1\ c$ التي هي سرعة الضوء c مطروحًا منها سرعتك $0.9\ c$. ولكن هذا لن يحدث. يتطلب ثبات سرعة الضوء أن قياس سرعة شعاع الضوء القادم في اتجاهه هو كامل سرعة الضوء وليس جزءًا منها. وبعبارة أخرى، فإن حقيقة ابتعادك عنه بسرعة ٩٠% من سرعة الضوء لن كون لها أى تأثير على الإطلاق على قياسات سرعة شعاع الضوء عندما يمر به. ويلخص شكل (٢-٣) هذه التجربة الذهنية.



شكل(٢-٣)

توضح هذه التجربة الذهنية عند سرعة عالية، ما نعنيه عندما نقــول إن الجميع يقيسون دائمًا نفس السرعة للضوء.

ما الحال في تجربتنا الذهنية لو أنه بدلا من الحركة بسرعة *0.9 c*، كان آل يتحرك بسرعة أو أسرع من سرعة الضوء؟ إن هذا يبدو كسؤال مشروع، ولكن تذكر إذا كان آل يمر بجوارك فينبغي أنه أتى من مكان ما. لذلك، دعنا نفكر ثانية من أين بدأ؛ وهنا من الأفضل، بما أن آل يقول إنك أنت من يسافر بسرعة عالية أن نجعل الأمر شخصيًا أكثر وأن نضع في اعتبارنا كيف بدأت **أنت**.

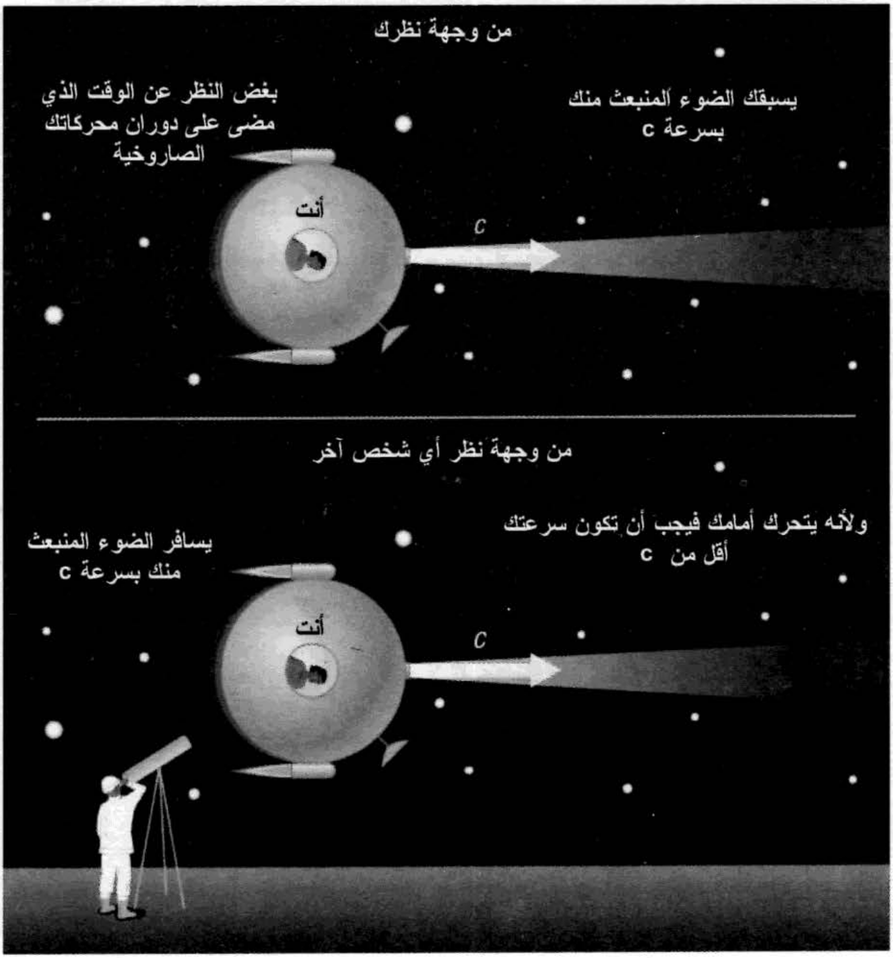
لقد قمت لتوك ببناء أكثر الصواريخ إثارة على الأطلاق، وستأخذه إلى الاختبار. وانطلقت في الحال أسرع من أي شخص يمكن تخيله على الإطلاق... ثم انتقلت إلى السرعة الثانية، والثالثة، وهلم جرًا. واستمر انطلاقك أسرع وأسرع وأسرع. وعندها قد تتساءل، هل سأبلغ سرعة الضوء؟

إن النقطة الأساسية هي أن تتذكر أن أية حركة نسبية، ولذلك فعندما نسأل إلى أية سرعة، فإننا يجب أن نسأل أيضًا "بالنسبة لمن؟". ودعنا نبدأ من وجهة نظرك. تخيل أنك أدرت المصابيح الأمامية لصاروخك. ولأن الجميع يقيسون دائمًا نفس السرعة للضوء، فإنك سترى أن أشعة المصابيح الأمامية تسافر مبتعدة عنك بسرعتها كاملة، السرعة الطبيعية للضوء، أو ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية. إن هذا سيكون صحيحًا في كل الأوقات وتحت كل الظروف، وبغض النظر عن أي مدى أدرت إليه محركات صاروخك. وبعبارة أخرى، لن تكون باستطاعتك إمكانية مواكبة أشعة الضوء المنبعثة من مصابيحك الأمامية.

والآن، دعنا نرى ما يقوله الآخرون عنك. وسواء أكان واحدًا على الأرض، أم واحدًا مثل آل في سفينته الفضائية، أو أي واحد آخر، فإن النسبية تقول لنا إن هناك أمرين يتفق عليهما الجميع: أولاً، يتفق الجميع على أن أشعة ضوء مصابيحك الأمامية تسير بسرعة الضوء، ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية. ثانيًا، ولأنه لا توجد

إلا حقيقة واحدة فالجميع يتفقون معك أيضًا على أن أشعة مصابيحك الأمامية تسبقك (شكل ٢-٤). وهكذا، فلأن الجميع يتفقون على أن أشعة مصابيحك الأمامية تسير بسرعة الضوء، وأنها تسبقك، فينبغي عليهم حتمًا استنتاج أنك تسير بسرعة **أبطأ** من سرعة الضوء. وتنطبق الحجة نفسها على أي مسافر آخر وأي جسم متحرك آخر والأمر صحيح بالنسبة للمصابيح الأمامية أو من دونها. تشع كل الأجسام أو ينعكس عنها ضوء من نوع ما، وما دام أن سرعة الضوء ثابتة فإن أي جسم مادي لا يستطيع مطلقًا أن يواكب الضوء الخاص به.

إنك تستطيع أن ترى الآن ما عنيت سابقًا، عندما قلت إن سؤالك عن الطريقة التي بإمكانك بها أن تسير أسرع من الضوء هو إلى حد ما شبيه بسؤالك عن الطريقة التي تستطيع بها أن تسير شمالا من القطب الشمالي. إنك لا تستطيع السير شمالا من القطب الشمالي لأن كل الاتجاهات عنده تكون إلى الجنوب. ولا تستطيع أن تسير أسرع من الضوء، لأنه لا توجد طريقة للحاق به، مهما كان ما فعلته. وبناء سفينة فضاء تسافر بسرعة الضوء ليس مجرد تحدٍّ تكنولوجي، إنه ببساطة أمر لا يمكن حدوثه.



شكل (٢ – ٤)

يلخص هذا الإيضاح لماذا يعني الثبات في سرعة الضوء أنك لا يمكن أن تصل أبدًا إلى سرعة الضوء. يعني ثبات سرعة الضوء أنك لا تستطيع أبدًا مواكبة الضوء المنبعث منك، وحيث إن الجميع كذلك سيقرون أن الضوء الذي ينبعث منك يسبقك، فسيكون استنتاجهم دائمًا أنك تسافر بسرعة أقل من سرعة الضوء.

أدرك أنك ربما ما زلت تبحث عن ثغرات في المنطق. وقد تفكر حول المجرات البعيدة التي أخبرتك عنها، التي ربما تبتعد عنا مع تمدد الكون بسرعة أكبر من سرعة الضوء. ألا يعني ذلك أنك – وأي امرئ آخر على الأرض – تبتعدون عنها أيضًا بسرعة أكبر من سرعة الضوء؟ هذا يحدث من زاوية ما، ولكن هذا هو السبب تمامًا في أن هذه النقطة خلافية. فإذا كان جسم بعيد يتحرك مبتعدًا عنك بسرعة أكبر من سرعة الضوء، فإن ضوءه لن يصل إليك وضوءك لا يستطيع اللحاق به[١]. ولذلك، لا يوجد أي **مقياس** يستطيع أي واحد أن يقيس به مثل هذا الضوء. ومرة ثانية، لا تقول النسبية "لا يستطيع شيء أن يسافر أسرع من الضوء"، ولكنها بالأحرى تقول لا شيء يمكنه أبدًا أن يتسارع إلى النقطة التي يستطيع بها أن يجتاز الضوء.

وأولئك الذين منكم على دراية ببعض الآثار الغريبة لميكانيكا الكم ربما يكونون على علم بثغرة مزعومة أخرى، وهي، أنه عند ظروف معينة معروفة بـ"التشابك *entanglement* الكمي"، فإن قياس جسيم في مكان ما يمكن أن يؤثر على جسيم موجود في مكان آخر **في نفس اللحظة**. ومع ذلك، فبينما تقترح التجارب المعملية أن هذا التأثير اللحظي من الممكن حدوثه حقيقة، فإن الفهم الحالي للفيزياء يقول بعدم إمكانية استخدامه لنقل أية معلومة مفيدة من مكان إلى آخر؛ وفي الواقع، إنك إذا كنت موجودًا في موقع الجسيم الأول وأردت أن تتأكد أن الجسيم الثاني قد تأثر فإنك تحتاج إلى أن تستقبل إشارة من مكانه، وتلك الإشارة لا

---

(١) ملحوظة: كما سنناقش في فصل ٨، المجرات البعيدة لا تسافر في الحقيقة مبتعدة عنا مع التمدد، ولكن التمدد بالأحرى، هو الذي يجعل الفضاء الذي بيننا وبين المجرات البعيدة يزداد مع الوقت. ونتيجة لهذا، فإن التغيرات في معدل التمدد يمكن أن تعني أن الضوء المنبعث من هذه المجرات التي تمضي مبتعدة بسرعة أكبر من سرعة الضوء من الممكن في بعض الحالات أن يظل في نطاق الكون المرئي، مما يسمح لنا برؤية هذه المجرات عندما كانت في مكانها البعيد. وفي الواقع، فإن التلسكوبات القوية تستطيع الآن ملاحظة مجرات من هذا القبيل. ومع ذلك، وما دام أن المسافة بيننا وبينها تزداد بمعدل أكبر من سرعة الضوء فإنه لا توجد طريقة ممكنة لأي شخص أو أي شيء حتى ينتقل من أيهما إلى الآخر.

يمكن أن تسافر إليك بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وحتى نكون واضحين حول مثل هذه الحالات، فإن الفيزيائيين يفضلون غالبًا أن يقولوا إن سرعة الضوء هي الحد الأقصى لسرعة انتقال أية معلومة، وما زال هذا يشبه من وجهة نظري، ما نقوله بأن أي شيء لا يستطيع اجتياز الضوء.

العَدّاء وشعاع الضوء

ولتوضيح أكثر النتائج المذهلة والمدهشة لثبات سرعة الضوء، سأعطيك مثالا إضافيًا. تخيل أن بطلا في سباقات العدو؛ دعنا نسميه بن. بعد أن قام بكسر الرقم العالمي في سباق مائة متر عدو، اتهم باستخدام منشطات أداء ممنوعة. ولأنه من النوع الشريف، فقد اعترف بمخالفته، ولكن أدى غياب شعوره الواضح بالندم إلى منعه من أية مسابقات رسمية. ولذلك فإنه قرر التركيز على تحسين مستواه بالأدوية والتمرينات الأكثر صعوبة من أي وقت مضى. وفي أحد الأيام، عقد مؤتمرًا صحفيًا ليعلن أنه ما دام تم منعه من المنافسة ضد أي من الناس فإنه ينوي أن يسابق شعاع ضوء.

تعالت حدة الإثارة بشكل هائل من إعلان بن، ولم تكن لديه أية مشكلة في اصطفاف الرعاة حوله. وأخيرًا، جاء يوم السباق، وانطلقت إشارة البدء في الاستاد الذي تم شراء تذاكره عن آخرها. ضرب بن بقدميه نقطة البداية وبسرعة فوق بشرية قام بتحطيم الرقم العالمي المسجل لمائة متر عدو، وأنهى المسافة كلها في ٨ ثوانٍ. ولسوء حظ بن، لم يتأثر الجمهور. فشعاع الضوء، المنطلق من نقطة البداية بسرعة الضوء قد قطع نفس المسافة في أقل من ١ على مليون من الثانية. عاد بن إلى منزله، مخزيًا مرة أخرى. ولكنه كان من النوع الذي لا يستسلم بسهولة.

تدرب سرًا، خلال العامين التاليين، مختبرًا كل أنواع منشطات الأداء، وهي في طور التجربة. وعندما نسيه الجمهور تقريبًا، عاد ثانية في النهاية، معلنًا

"أنا مستعد لمباراة العودة". عندها كان من الصعب على الرعاة مناصرته، ولم يحضر إلا عدد قليل من المشاهدين في يوم السباق. ولكن بالنسبة لأولئك القليلين الذين كانوا هناك لمشاهدته، انبثق مشهد لا يمكن تصديقه. عندما توقف صوت البندقية التي تعلن إشارة البدء، طار بن من نقطة البداية بسرعة هي ٩٩,٩٩% من سرعة الضوء وحافظ عليها حتى النهاية. ولأن هذا يعني أن السباق بأكمله قد تم في واحد على مليون من الثانية، فقد أعاد الجمهور المثار شريط السباق بالحركة فائقة البطء.

أوضحت الإعادة أن الضوء، بالطبع، قد بدأ وأنهى السباق بسرعة الضوء الكاملة، وبالتالي فإنه فاز ثانية، ولكن بالكاد! ولأن سرعة بن كانت أبطأ فقط بـ *c 0.0001* من سرعة الضوء، تسحب الضوء تدريجيًا عندما دخل كلاهما المضمار، واجتاز الضوء خط النهاية بسنتيمتر واحد فقط عن بن.

أصاب الجمهور هياج شديد، واندفع مراسلي الشبكات التليفزيونية لإجراء الأحاديث مع بن. ولكن تبين أنه مفقود. وفي النهاية قام أحد المراسلين بتفقد حجرة خلع الملابس ووجد بن عابسًا وحوله فوطته. "ما الخطأ؟" سأله المراسل. استدار بن والدموع في عينيه وقال "عامان من التدريب والتجارب وهزمني الشعاع هزيمة منكرة في هذه المرة كما في المرة السابقة".

ولعلك تدرك ما حدث. من وجهة نظر الجمهور، فإن نتيجة السباق مع الضوء كانت قريبة جدًا، لأن بن كان مبطئًا بدرجة قليلة جدًا عن سرعة الضوء. ولكن من وجهة نظر بن فإن معنى الثبات في سرعة الضوء أنه قد رأى شعاع الضوء يمضي بالسرعة الكاملة لسرعة الضوء أسرع منه. وبعبارة أخرى، فإن الضوء ما زال أسرع منه كما كان الحال منذ عامين. والعزاء الوحيد الذي سيحصل عليه، هو أنه لدهشته سيكتشف أنه عندما ركض فإن مسار السباق كان قصيرًا بشكل غير متوقع. ولكن ذلك الموضوع هو موضوع الفصل التالي.

(٣)

إعادة تعريف المكان والزمان

حدث القِصَر في مسار السباق الذي واجهه بن بينما كان يجري لنفس السبب الذي جعلك تجد مسافتك أقصر إلى الثقب الأسود أثناء رحلتك التخيلية في فصل ١. ويرتبط هذا ارتباطًا وثيقًا أيضًا بالسبب في أن الوقت الذي مر بالنسبة لك كان أقل منه بالنسبة للناس الموجودين على الأرض أثناء رحلتك، وهذا فضلا عن آثار أخرى وصفتها النظرية النسبية الخاصة لأينشتاين. وتشمل هذه الآثار فكرة أن المشاهدين في أطر مرجعية مختلفة قد يختلفون حول ما إذا كان حدثان متزامنان والتكافؤ الشهير للكتلة والطاقة *mass-energy equivalence* المتجسد في المعادلة: الطاقة تساوي الكتلة في مربع سرعة الضوء $E= mc^2$.

وفي هذا الفصل، سنستخدم المزيد من التجارب الذهنية لتوضيح أن كل هذه الأفكار المذهلة هي نتائج مباشرة لثبات سرعة الضوء. وكما سنرى فإن التماشي مع ثبات سرعة الضوء يتطلب تغييرًا جوهريًا في مفاهيمنا القديمة للمكان والزمان. ودعونا نبدأ بفحص الكيفية التي يؤثر بها ثبات سرعة الضوء على الزمن.

السرعة والمسافة والوقت

في حياتنا اليومية، نتوقع من المراقبين في أطر مرجعية مختلفة أن يعطونا نتائج مختلفة لسرعة الأجسام التي تتحرك، ولكنها تتفق مع أوقات الانتقال. وكمثال بسيط، تخيل أنك بالاستعانة بشريط قياس، قمت بقياس المسافة التي تمشيها من المنزل إلى العمل بدقة ووجدت أنها ١٠ كيلومترات. وعندئذ ركبت دراجتك

ووجدت أنها تستغرق منك ٣٠ دقيقة، أو نصف ساعة، للركوب من المنزل إلى العمل. ولأن السرعة هي المسافة مقسومة على الوقت فإنك تستنتج أن سرعتك على الدراجة هي ١٠ كيلومترات مقسومة على نصف ساعة = ٢٠ كيلومترًا في الساعة. انظر الآن، إلى الكيفية التي تبدو بها رحلتك في نظر شخص يراقبها من القمر، وكما ناقشنا سابقًا (انظر شكل ٢-١)، سيرى الملاحظ من القمر أنك تنتقل بسرعة أكبر من ٢٠ كيلومترًا في الساعة، لأنه سيرى انتقالك بالإضافة إلى سرعة دوران الأرض؛ وعلى سبيل المثال، إذا كنت عند خط الاستواء وتنتقل من الغرب إلى الشرق (الاتجاه الذي تدور إليه الأرض)، فإنه سيقول إنك تنتقل بسرعة ١٦٩٠ كيلومترًا في الساعة (سرعة دراجتك ٢٠ كيلومترًا في الساعة زائد سرعة دوران الأرض عند خط الاستواء ١٦٧٠ كم/ ساعة). هذه السرعة العالية جدًا سيكون لها معنى، لأنهم سيرون أنك تنتقل مسافة أكبر، خلال ركوبك لمدة نصف ساعة، سيرون أنك تنتقل نصف الـ١٦٩٠ كم أو ٨٤٥ كيلومترًا. ومع حساب بسيط لتأثير دوران الأرض، فإنهم يستطيعوا أن يحسبوا أن المسافة من منزلك إلى العمل على سطح الأرض هي ١٠ كيلومترات، وهذا يتوافق مع قياسك للمسافة.

ولكن ماذا يحدث إذا تحولنا إلى **الضوء** وجعلناه يقوم برحلة من منزلك إلى العمل؟ ولنفرض مثلاً، أنك أدرت مصباحًا وقمت بحساب الوقت الذي يستغرقه الضوء في الانتقال من منزلك إلى العمل (تستطيع إنجاز ذلك، مثلاً، بوضع مرآة في العمل وحساب وقت رحلة ذهاب الضوء وعودته ثم تقسمها على اثنين). وهنا يجب أن يقيس الملاحظ على القمر نفس السرعة لشعاع الضوء، بحيث إنها ستساوي بالضبط نفس سرعة الضوء التي قمت بقياسها؛ وأن حقيقة أنهم لاحظوا أنك تتحرك مع دوران الأرض لن تغير من السرعة التي يقومون بقياسها لشعاع الضوء.

وهنا، نأتي إلى نقطة جوهرية: سيرى الملاحظ من القمر أن شعاع الضوء ينتقل مسافة أكبر من المسافة التي ترى أنت أنه قطعها، بسبب حركته مع حركة

دوران الأرض. ومع ذلك، ولأنهم سيقيسون السرعة بحيث تكون نفس السرعة التي قمت بقياسها بالضبط – وبسبب أن السرعة تساوي دائمًا المسافة مقسومة على الزمن – فإنهم مجبرون على حساب أن الزمن الذي يستغرقه الضوء لينتقل من منزلك إلى عملك هو أكبر من الزمن الذي تقول أنت إن الضوء استغرقه في الرحلة. (وفقط حتى نتأكد من وضوح ذلك: لأن السرعة تساوي المسافة مقسومة على الزمن، فالطريقة الوحيدة لحساب نفس السرعة عند وجود مسافة أكبر هي بتقسيم هذه المسافة الأكبر على زمن أكبر). وعلاوة على ذلك،.فبسبب اختلافك والملاحظين على القمر حول الزمن الذي يستغرقه الضوء للانتقال من منزلك إلى عملك واتفاقكم على سرعة انتقال الضوء، فينبغي أنكم ستختلفون أيضًا على المسافة من منزلك إلى عملك عندما نقيسها من سطح الأرض. وبعبارة أخرى، فحقيقة أن الجميع يتفقون دائمًا على سرعة الضوء تعني أنهم لا يعودون جميعًا متفقين على قياسات الزمن والمسافة. وستكون الخلافات صغيرة جدًا في هذه الحالة، بسبب أن دوران الأرض بطيء جدًا بالقياس إلى سرعة الضوء[1]. وسيصبح التأثير مهولا جدًا إذا انتقلنا الآن إلى تجربة ذهنية عند سرعة عالية.

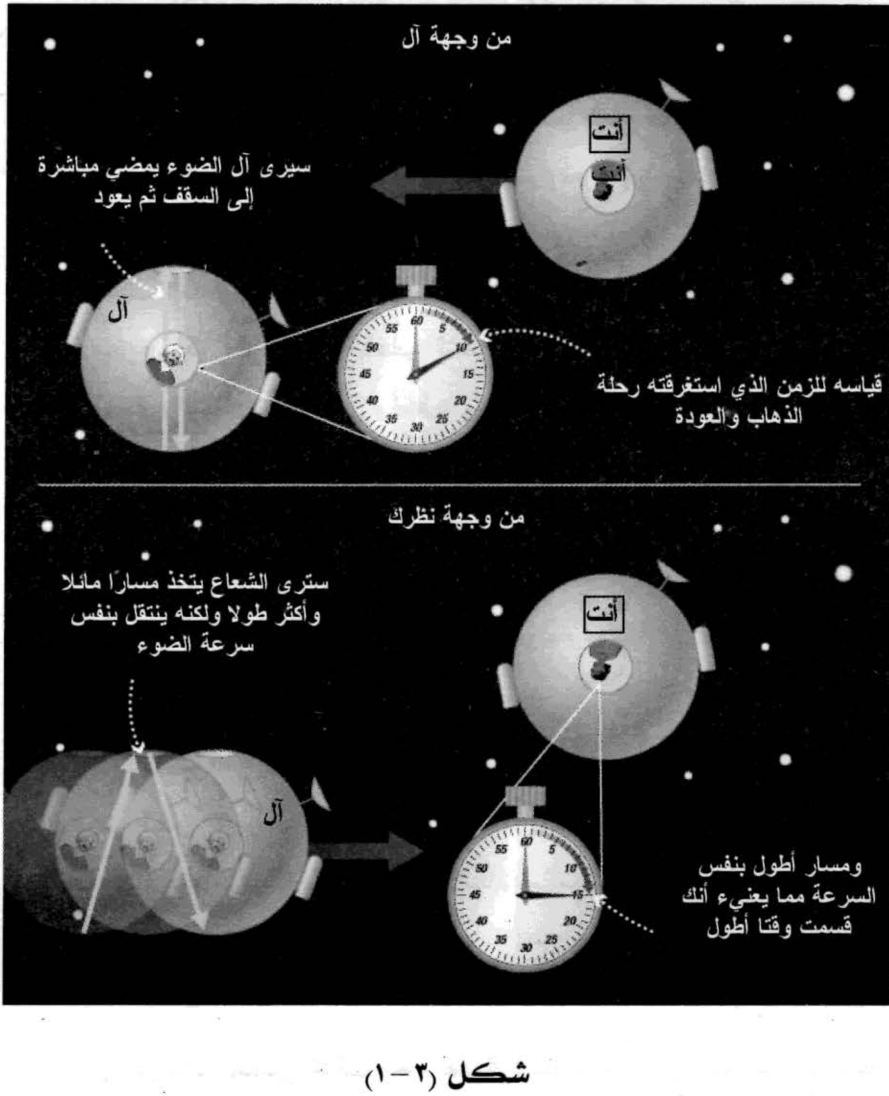
---

(١) إذا كان لديك فضول حول مقدار الاختلاف: فإن الزمن الذي قمت بقياسه لانتقال الضوء مسافة ١٠ كيلومترات من منزلك إلى العمل سيكون نحو ٣٣ ميكرو ثانية (الذي هو ١٠ كم مقسومة على سرعة الضوء). وإذا قمت بضرب ٣٣ ميكرو ثانية في سرعة دوران الأرض، فستجد أن دوران الأرض سيحملك إلى نحو مسافة ١٥ ملليمترًا أثناء رحلة الضوء من منزلك إلى عملك. وبعبارة أخرى، فإن الملاحظ على القمر سيضيف إلى انتقالك نحو ١٥ ملليمترًا بسبب دوران الأرض، وهي مسافة صغيرة جدًا بالنسبة إلى مسافة الـ ١٠ كيلومترات التي قمت بقياسها من المنزل إلى العمل، التي سيكون لها تأثير ضئيل جدًا على الطريقة التي تقيس بها أنت والملاحظ على القمر المسافة والزمن.

تمدد الوقت

تعود أنت وآل إلى سفنكم الفضائية وتطفوان بحرية. تشعر أنك ساكن وترى آل يتحرك متجاوزًا إياك بسرعة عالية. ويقول آل بالطبع، إنه ساكن وأنت من يتحرك متجاوزًا إياه بسرعة عالية. ولا توجد أية مشكلة حتى الآن في هذا، لأن نقاط رؤيتكم المختلفة تعكس ببساطة حقيقة أن أية حركة نسبية. والآن، تخيل أن آل لديه ليزر بالأرضية وذلك الليزر موجه إلى مرآة في السقف. وكما هو موضح في الجزء العلوي من الشكل (٣-١)، أضاء آل الليزر لحظيًا بحيث إن شعاعه انتقل إلى المرآة الموجودة بالسقف، التي عكسته ثانية إلى الأرضية. استخدمتما أكثر الساعات دقة، وقمتما بقياس رحلة ذهاب الضوء من أرضية سفينة آل إلى سقفها ثم عودته ثانية إلى الأرضية. ماذا ستكون النتائج؟

من وجهة نظرك، سرعة آل العالية ستحرك سفينته بشكل ملحوظ أثناء الوقت الذي يذهب فيه الضوء من الأرضية إلى السقف ويعود. ونتيجة لذلك، سترى شعاع الليزر يأخذ مسارًا على شكل مثلث كما هو موضح في الجزء السفلي من الشكل (٣-١). وحسب طريقتنا في التفكير قبل فهم النسبية لن تكون هناك مشكلة كبيرة. أنت وآل ستتفقون على طول الوقت الذي يستغرقه الضوء في ذهابه من الأرضية إلى السقف وعودته إلى الأرضية، ولكنكما لن تتفقا على السرعة التي يقطع بها الضوء رحلة ذهابه وعودته. ولكن هذه الحالة غير ممكنة، لأن الجميع يقيسون دائمًا نفس السرعة للضوء.



شكل (٣ – ١)

يضيئ آل الليزر من أرضيته إلى مرآة السقف. وحركته للأمام ستجعلك تراه يأخذ مسارًا أطول على شكل مثلث. ولأنك وآل متفقون على ثبات سرعة الضوء فإن الوقت الذي ستقوم بقياسه سيكون وقتًا أطول حتى يتم ذلك المسار الأطول.

ولتفهم **حقيقة** ما يحدث، تذكر أن أية سرعة انتقال عندما تسافر مسافة أكبر فإنها تستغرق وقتًا أطول. وعلى سبيل المثال، إذا كانت سرعتك ١٠٠ كيلومتر في الساعة، فإنك بالتأكيد ستحتاج إلى وقت أطول عندما تقطع مسافة ١٥ كيلومترًا عن الوقت الذي تحتاجه عندما تقطع ١٠ كيلومترات. ونعود إلى سفننا الفضائية، أنت وآل تتفقان على أن الشعاع ينتقل بسرعة الضوء أي ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية. ولذلك، بسبب المسار الذي يأخذ شكل مثلث الذي ترى أن الشعاع يقطعه، فإنك بالتأكيد سترى وقتًا أطول لرحلة ذهاب الشعاع وعودته عن الوقت الذي يراه آل بالنسبة لمساره المباشر إلى أعلى وأسفل، وعليه فإنك **ستقيس قياسًا أطول للوقت** الذي تستغرقه رحلة ذهاب الضوء وعودته. وبعبارة أخرى، إذا نظرت إلى ساعة آل عندما ينجلي الأمر، فإنك سترى أنها تسير **بمعدل أبطأ** من ساعتك، لأن ذلك هو السبيل الوحيدة الذي عن طريقها يمكن أن تعرض ساعة آل وقتًا أقل لمرور الوقت عن الذي تعرضه ساعتك خلال رحلة ذهاب الضوء وعودته.

وعليك أن تلاحظ أنه لا يهم نوع الساعة التي تستخدمها أنت وآل في قياس الزمن الذي تستغرقه رحلة ذهاب الشعاع وعودته. فإنك ستحصل على نفس النتيجة سواء قمت بقياس الزمن بساعة ميكانيكية أو إلكترونية، أو ذرية، أو بدقات القلب، أو بالتفاعلات البيو كيميائية. ففي كل تلك الحالات ستلاحظ أن ساعة آل تسير بمعدل أبطأ من ساعتك. واستنتاجنا المذهل هو: من وجهة نظرك، يمضي الوقت **نفسه** أبطأ عند آل.

إلى أي مدى يمضى الوقت أبطأ عند آل؟ يعتمد هذا على سرعته بالنسبة لك. إذا كان ينتقل ببطء بالمقارنة بسرعة الضوء، فإنك ستستطيع بالكاد تحديد نسبة الميل في مسار الضوء وساعتك وساعة آل ستدقان تقريبًا بنفس المعدل. وهذا هو السبب في أننا لا نلاحظ مثل هذه التأثيرات في حياتنا اليومية، التي تكون فيها

سرعة السفن الفضائية هي عبارة عن كسر صغير من سرعة الضوء. والميل في مسار الضوء – وما يترتب عليه من إبطاء للزمن– يصبح ملحوظاً فقط عندما تبدأ سرعة آل في الاقتراب من سرعة الضوء. وكلما كان انتقاله أسرع، كلما كان الميل في مسار الشعاع أوضح بالنسبة لك، وكلما زاد الفارق بين معدل ساعته وساعتك.

هذا التأثير، الذي يسير فيه الوقت بصورة أبطأ في الأطر المرجعية التي تتحرك بالنسبة لك، يسمى تمدد الزمن ***time dilation***؛ وتجيء هذه التسمية من فكرة أن الوقت يتمدد أو يتسع في الإطار المرجعي المتحرك. وكلما ازدادت سرعة الإطار المرجعي الذي يتحرك كلما ازداد البطء الذي تراه في الوقت الذي يمر فيه.

وفي حالة ما إذا كنت تود تحري المزيد من الدقة، فإنه من السهل أن تحسب العامل الذي يتباطأ فيه الوقت في الإطار المرجعي المتحرك. فعليك اتباع ثلاث خطوات بسيطة فقط[١]:

١- اكتب سرعة الجسم المتحرك في صورة كسر بالنسبة لسرعة الضوء.

٢- احسب مربع هذا الكسر وقم بطرحه من ١.

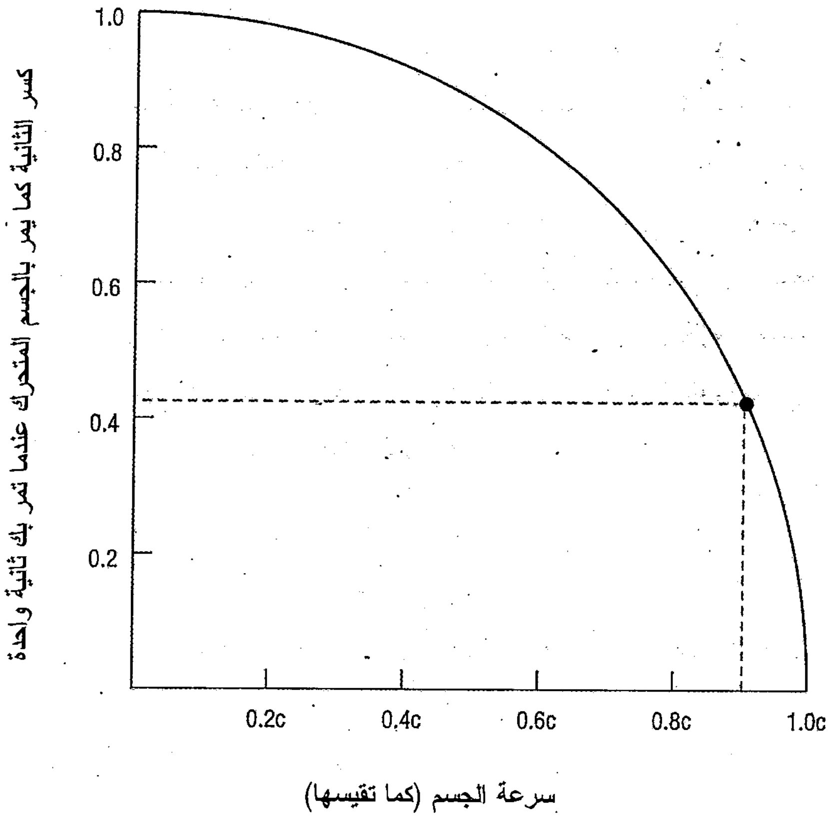
٣- احسب الجذر التربيعي للقيمة الناتجة.

وعلى سبيل المثال، افترض أن آل يجتازك بسرعة هي ٩٠% من سرعة الضوء، أو *0.9 c*. الخطوة الأولى: أن نستخدم هذا الكسر، ٠,٩. والخطوة الثانية

(١) إذا كانت لا تزعجك المعادلات، فإنه من الأسهل أن تضع الخطوات الثلاث في معادلة وحيدة، التي يمكن استنتاجها ببساطة بتطبيق نظرية فيثاغورث بالنسبة لمثلث شعاع الضوء الموضح في شكل (٣-١):
الوقت في الإطار المرجعي المتحرك =الجذر التربيعي لـ{(الوقت في إطارك الثابت x ١- (سرعة الجسم المتحرك/سرعة الضوء)٢}

هي أن نحسب مربع هذا الكسر وهذا يعطينا[٢] (٠,٩)=٠,٨١، ثم نطرح القيمة من ١ فتعطينا ١−٠,٨١= ٠,١٩. والخطوة الأخيرة نحسب الجذر التربيعي بالآلة الحاسبة فتنتج القيمة التالية $\sqrt{0.19} \approx 0.44$. ويعطينا هذا أنه عندما ينتقل آل بسرعة $0.9\ c$ بالنسبة لك، فإنك ستلاحظ أن معدل الوقت الذي يمر به هو ٤٤% فقط من وقتك. وبطريقة أخرى، إذا كان بمقدورك متابعة ساعته فستلاحظ أن الوقت الذي مر بك في ١٠ ثوان كان في ساعته ٤,٤ ثوانٍ فقط؛ وبالمثل عند مرور ١٠٠ عام بالنسبة لك سيمر عليه ٤٤ عامًا فقط.

وبمقدورنا تطبيق هذه الأفكار بصورة أعم عن طريق عمل رسم تخطيطي يوضح الكيفية التي يتباطأ بها الزمن كلما زادت سرعة الجسم؛ ونتائج ذلك موضحة في شكل (٣−٢). يوضح المحور الأفقي سرعة الجسم كما تقيسها أنت، بينما يوضح المحور الرأسي كسر الثانية من الوقت الذي يمر بالجسم في كل ثانية واحدة تمر بك. وعندما تكون السرعة منخفضة جدًا عن سرعة الضوء، فإن الوقت الذي يمر بالجسم المتحرك لا يقل بصورة ملحوظة عن ثانية واحدة، مما يعني أن الوقت بالنسبة لك وبالنسبة للجسم المتحرك يمران تقريبًا بنفس المعدل. ولكن كلما زادت سرعة الجسم المتحرك فإن الوقت يتباطأ بصورة ملحوظة. وعلى سبيل المثال، توضح الخطوط المتقطعة، النتيجة التي حسبناها فيما سبق عند سرعة 0.9 c، وستلاحظ أن آل يمر بـ ٠,٤٤ ثانية فقط، خلال كل ثانية واحدة تمر بك. ولاحظ أن الرسم التخطيطي ينخفض إلى الصفر عندما تقترب السرعة من سرعة الضوء، مما يعني المزيد والمزيد من تباطؤ الوقت كلما اقتربت سرعة الجسم أكثر وأكثر من سرعة الضوء.



شكل (٣ – ٢)

يوضح هذا الرسم التخطيطي التباطؤ في الزمن عندما تقترب سرعة جسم من سرعة الضوء. والخطوط المتقطعة توضح أنه عند سرعة $0.9\ c$، فإن معامل التباطؤ في الزمن هو ٠,٤٤. وعند سرعات أعلى فإن الزمن يتباطأ بصورة أكبر. ومن حيث المبدأ، يتوقف الزمن عندما يتحرك الجسم بسرعة الضوء.

إن التباطؤ في الزمن يقدم لنا جانبًا آخر للنظر في حقيقة أنه لا يمكن لأي جسم أن يتسارع أبدًا بما فيه الكفاية ليصل إلى سرعة الضوء.

تخيل رؤيتك لسفينة فضاء تتسارع مبتعدة عنك بحيث تزيد سرعتها باستمرار ما دام يحافظ الربان على دوران محركاتها. وعندما اقتربت السفينة من سرعة الضوء فإن زمنها سيتباطأ، مما يعني أنك سترى محركاتها تشتعل بصورة أبطأ وأضعف حتى لو كان الربان يديرها بقوتها الكاملة. وعلى الرغم من أن السفينة قد تقترب أكثر وأكثر من سرعة الضوء، فإنها لن تستطيع أبدًا أن تحصل على الدفع النهائي للمحرك المطلوب لوصولها لسرعة الضوء، لأن الزمن سيتوقف تمامًا من حيث المبدأ عند تلك السرعة. وهذا معناه، أن السفينة لن تستطيع أبدًا أن تصل إلى سرعة الضوء، لأنه لن يكون لديها وقت كافٍ لذلك.

الطول والكتلة

وحقيقة أن الوقت يختلف باختلاف الأطر المرجعية تتضمن بالتالي أن المسافات (أو الأطوال) والكتل ينبغي أن تتأثر أيضًا بالحركة. دعونا نبدأ بالطول، بالعودة إلى العداء، بن عندما كان يسابق شعاع الضوء.

ولأن بن كان ينتقل عبر حلبة الـ ١٠٠ متر بسرعة تقترب كثيرًا من سرعة الضوء، فإن وقته كان ولابد أن يتباطأ كثيرًا عن وقتنا ووقت الناس الآخرين الذين كانوا يشاهدونه في الاستاد. وبالفعل، إذا قلنا إنه كان يعدو بسرعة $0.9999\ c$، فالطريقة الحسابية المذكورة أعلاه تعطينا أن الوقت الذي سيمر به سيكون ١,٤% فقط من سرعة وقت المتفرجين (لأن الجذر التربيعي لـ: (١− (٠,٩٩٩٩)^2 = ٠,٠١٤). ولذلك، فإنه من وجهة نظره، بمقدوره أن يغطي مسافة أزيد بـ ١,٤% على المسافة التي نقول إنه قطعها. وبالنسبة له فإن، سباق الـ ١٠٠ متر طوله هو ١,٤ متر فقط أثناء جريه.

نستطيع أن نستخدم نفس الفكرة لشرح ما حدث لرحلتك إلى الثقب الأسود في فصل ١. تذكر أنك قمت بالرحلة بسرعة ٩٩% من سرعة الضوء أو *0.99 c*. وتدلنا طريقتنا الحسابية على سرعة الوقت الذي مر بك أثناء الرحلة هو ١٤% تقريبًا بالنسبة إلى أولئك الذين ظلوا مثلنا على سطح الأرض. ولأن رحلتك التي قد سافرتها بهذه السرعة استغرقت ٥٠,٥ عام، كما رأيناها في الأرض، فإن ١٤% منها فقط أو نحو ٧ سنوات هي التي مرت بك. (أما الـ ٦ شهور التي أمضيتها في الدوران حول الثقب الأسود فسيكون حسابها بالضرورة مشابهًا لأولئك الموجودين على الأرض، حيث إنك قمت فيها بالدوران على بعد كاف من الثقب الأسود والذي كان أثر جاذبيته ضئيلا جدًا على زمنك). وعلاوة على ذلك، فإنك ستتفق معنا على أننا عندما نقول إنك تتحرك بعيدًا عن الأرض بسرعة *0.99 c* في رحلتك الخارجية، فإنك سترى أن الأرض تتحرك مبتعدة عنك بسرعة *0.99 c*. وحيث أنك ستقوم بالرحلة في زمن هو ١٤% فقط من الزمن الذي نقول إنها تستغرقه، فإن قياسك للمسافة التي تسافرها سيكون ١٤% فقط من ناحية الطول. ولهذا السبب تقلصت مسافة الـ٢٥ سنة ضوئية إلى الثقب الأسود لتصبح ٣,٥ سنوات ضوئية فقط عندما قطعتها بهذه السرعة.

وفكرة القياس الأقصر للمسافة كمسافر يمكن تحويرها، حيث تقودنا إلى استنتاج يتعلق بها. تذكر أن الحركة دائمًا نسبية، وكل وجهات النظر إليها صحيحة بشكل متساو. وعلى سبيل المثال، فمن وجهة نظر بن لمسار السباق، فإنه بمجرد ما حرك قدميه كان السباق قد تم. ولذلك فبمجرد ما وجد أن المسار يتقلص في الاتجاه الذي يمضي إليه، فإننا وجدنا أن بن يتقلص أيضًا في الاتجاه الذي يمضي إليه[1].

---

(١) من الضروري أن تدرك أنه بينما تقودنا الدراسة الدقيقة للموقف إلى الاستنتاج بأن بن يتقلص في اتجاه الحركة، فإننا لا نراه في الحقيقة مسطحًا عندما ننظر إليه. والسبب هو أنه عند تلك السرعات العالية، فإن ما نراه يتأثر ايضًا بالاختلافات التي تحدث في زمن انتقال الضوء من الأجزاء المختلفة من جسده إلينا في النقاط المختلفة لمسار السباق. وتقدم العديد من المواقع الإلكترونية محاكاة لما تبدو عليه الأجسام بالفعل عندما تتحرك أمامنا بسرعة عالية.

وبعبارة أخرى، فإن القياس المسطح لـ بن يكون في اتجاه حركته. (فطوله وعرضه لن يتأثرا). وبطريقة مشابهة، إذا كان طول سفينة الفضاء التي ستأخذها إلى الثقب الأسود هو ١٠٠ متر عندما تكون ساكنة، فسنجد أنها ستصبح أقصر من ذلك عندما تسافر بها على سرعات عالية. ولهذا السبب، فإن التأثيرات على المسافة والطول في النسبية تسمى عادة **انكماش في الطول**. والمعامل الذي ينكمش به الطول بالنسبة للجسم المتحرك هو نفس المعامل الذي يتمدد به الزمن، ولذلك فإنه بإمكانك استخدام الرسم التخطيطي في شكل (٣-٢) بالنسبة للطول كما استخدمته بالنسبة للزمن.

وعندما نتكلم عن الكتلة، تدلنا النسبية على أن الجسم المتحرك تصبح كتلته **أكبر** من كتلته وهو ساكن(١). وإذا أردت معرفة هذه الزيادة، فعليك فقط بالقسمة على المعامل الذي وجدناه بالنسبة لتمدد الزمن وانكماش الطول. وعلى سبيل المثال، فقد وجدنا أنك أثناء رحلتك إلى الثقب الأسود بسرعة $0.99\ c$، سيكون الوقت الذي تقطعه هو ١٤% فقط من الوقت الذي نمر به، وقياس سفينتك الفضائية سيكون ١٤% فقط من طولها عند عدم حركتها. وبناء عليه، فلأن ١٤% هي نفسها ٠,١٤، فإننا نستنتج أن كتلة سفينتك يبدو أنها ستصبح ١/٠,١٤ ≈ ٧,١ مرات أكبر من كتلتها وهي ساكنة. وبعبارة أخرى، إذا كانت الكتلة العادية أثناء السكون هي

---

(١) مفهوم زيادة الكتلة هو بطريقة ما تبسيط شديد، لأن ما نلاحظه بالنسبة للجسم المتحرك هو الاندفاع والطاقة، وفي المعالجة النسبية الرياضية يتحد هذا فيما نسميه (الطاقة الاندفاعية) (الاندفاع الرباعي). ولهذا السبب فعلى الرغم من أن "زيادة الكتلة" قد تم تداولها في تعليم النسبية لعقود عديدة يفضل الفيزيائيون اليوم في التعامل مصطلح الزيادة في الطاقة الاندفاعية، الذي يسمح لهم بمعالجة الكتلة ككمية ثابتة لا تزيد مع السرعة. ويصبح هذا التحديد أكثر أهمية عند التعمق في دراسة النسبية، ولكن كمقدمة تمهيدية في هذا الكتاب، فإنني أعتقد أنه سيكون من الأسهل استخدام المقاربة القديمة بالتفكير في زيادة الوزن.

٥٠ كيلوجرامًا فإن الكتلة ستزيد إلى ٥٠ x ٧,١ = ٣٥٥ كيلوجرامًا تقريبًا عندما تتحرك بـ٩٩% من سرعة الضوء. وكما هو معتاد، عليك أن تتذكر، **بأنك** ستظل تظن بأن كتلتك كما هي، لأنك ستظن أنك لا تتحرك. ومن يلاحظونك منا فقط، هم الذين سيجدون أن كتلتك أكبر؛ وعلى سبيل المثال، إذا اصطدمت بشيء ما فإن قوة التصادم ستكون أكبر بنحو ٧ مرات عما نتوقعه إذا ما وضعنا في الاعتبار كتلتك الطبيعية، مما يعزز بأن كتلتك ستبدو أكبر بنحو ٧ مرات تقريبًا عندما تتحرك.

لماذا يتضح أن الكتلة تزيد بهذه الطريقة؟ هناك عدة طرق متكافئة للنظر إلى ذلك، ولكني أجد أن أوضحها هو استخدام تجربة ذهنية أخرى. تخيل أن لـ آل أخًا توأمًا ولديه سفينة مماثلة، ولكن أخاه لا يتحرك في إطارك المرجعي بينما آل يتحرك بسرعة عالية. وفي اللحظة التي يمر بها آل، فإنك تعطي كلا من آل وأخيه دفعة متماثلة، بحيث أنك تدفعهما بنفس القوة لنفس الفترة الزمنية. تفكيرنا قبل معرفة النسبية، والذي يكون فيه لنفس السفينتين نفس الكتلة، فإنك ستتوقع أن دفعتك ستؤدي إلى تسارع كليهما بنفس المقدار، وأن كليهما يكتسب زيادة مقدارها ١ كيلومتر في الثانية في سرعته بالنسبة لك. وهنا عليك أن تفكر فيما يحدث بالنسبة للزمن: ولأن آل يتحرك بالنسبة لك وبالنسبة لأخيه، فإن هذا يعني بأنه يشعر بدفعتك لوقت أقصر، وسيكون لها تأثير أقل عليه، مما يجعل تسارعه أقل من تسارع أخيه. والطريقة الوحيدة لتفسير كيفية أن دفعتيك المتماثلتين من الممكن أن تسبب تسارعًا أقل بالنسبة لآل هي أن تكون كتلة آل أكبر من كتلة أخيه[1].

وتقدم مسألة زيادة الكتلة وسيلة أخرى لشرح سبب عدم قدرة أي جسم مادي على بلوغ سرعة الضوء. فكلما كان الجسم أسرع بالنسبة لك، وجدت أن كتلته

(١) تذكر، للمرة الثانية، أن مفهوم "زيادة الكتلة" لم يعد يستخدمه الفيزيائيون، الذين يدرسون النسبية، ولكن هذا التحديد سيصبح مهمًا إذا قمت بالتعمق في دراسة النسبية، وهو لا يؤثر في مقدمتنا البدهية.

تزداد. ولذلك، كلما ازدادت السرعة وازدادت، فإن نفس القوة ستؤدي إلى التناقص أكثر وأكثر في مقادير التسارع. وعندما تقترب سرعة الجسم من سرعة الضوء، ستجد أن كتلته تتجه إلى الزيادة نحو ما لا نهاية. ولا توجد قوة بمقدورها أن تساعد جسمًا كتلته لا نهائية على أن يتسارع، ولهذا فإن الجسم ليس بمقدوره أن يكتسب هذا القدر الضئيل النهائي اللازم له لدفعه ليصل إلى سرعة الضوء.

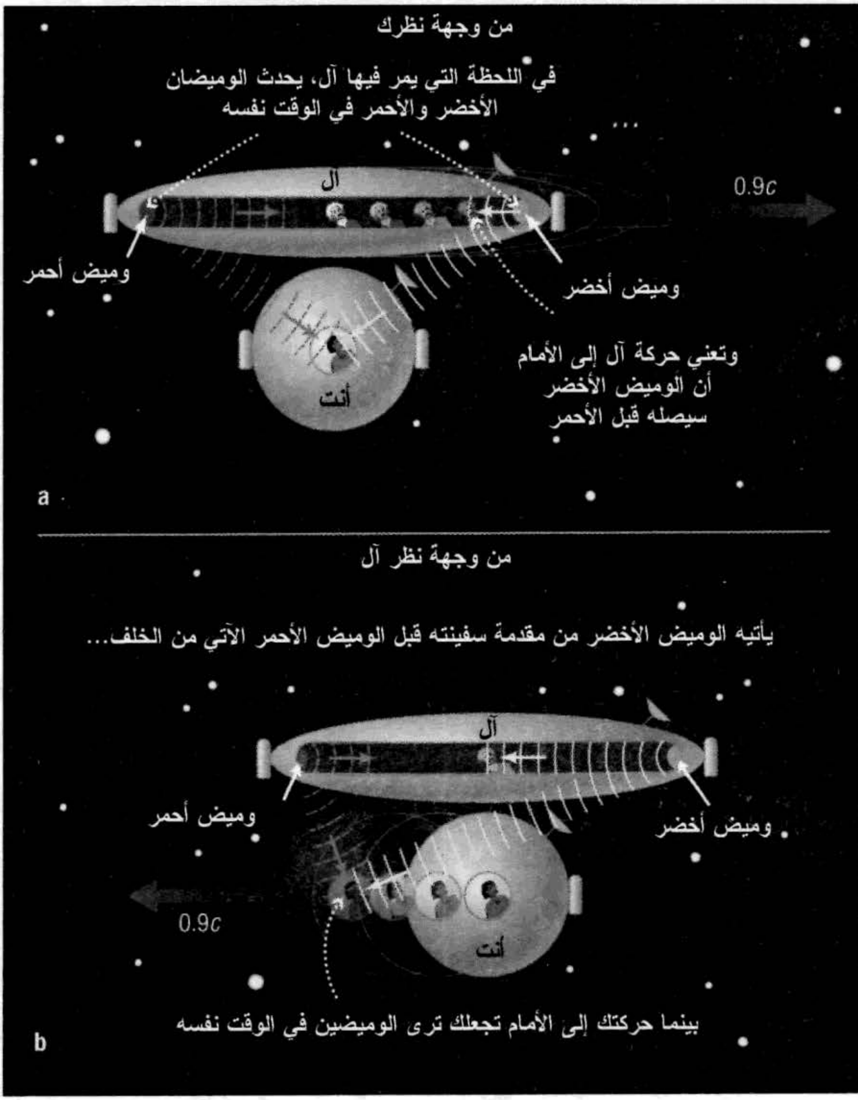
نسبية التزامن

قمنا بتغطية كل النتائج المهمة للنسبية الخاصة، وهي المفاهيم التي تتعلق بأن الأطر المرجعية للأجسام المتحركة يكون لها: (١) زمن أبطأ (٢) طول أقصر و(٣) ازدياد في الكتلة. ونستطيع أن نتفرع من هذه المفاهيم الثلاثة، إلى نتائج عديدة مذهلة، أو تبدو غير منطقية أكدتها النسبية الخاصة. ولا نستطيع تغطيتها جميعًا في كتاب صغير مثل هذا، ولكن أود أن أجذب انتباهك إلى واحدة منها ستكون لها أهمية خاصة عندما نحاول في الفصل التالي إعادة تعريف "الإدراك العام" بحيث يتلاءم مع النسبية. إنها فكرة تسمى أحيانًا باسم **نسبية التزامن** *relativity of simultaneity*.

يخبرنا إدراكنا العام القديم بأنه على الجميع أن يتفقوا على إذا ما كان حدثان يقعان في نفس الوقت أو أن حدثًا ما يقع قبل آخر. وعلى سبيل المثال، إذا رأيت تفاحتين – واحدة حمراء والأخرى خضراء– يقعان من فوق شجرتين مختلفتين ويصلان إلى الأرض في نفس الوقت، فإنك تتوقع أن الجميع أيضًا سيوافقون على أنهما وصلا إلى الأرض بنفس الوقت (مع فرضية أنك قد وضعت في الاعتبار أي اختلاف في زمن انتقال الضوء من الشجرتين). وبالمثل، فإنك إذا رأيت التفاحة الخضراء قد وقعت على الأرض قبل التفاحة الحمراء، فإنك ستكون مندهشًا إذا ما قال شخص آخر بأن التفاحة الحمراء قد وصلت إلى الأرض أولا. حسنًا، جهز نفسك لتندهش.

ومع ذلك، قبل أن أصيبك بالدهشة، من المهم أن نكون واضحين حول ما هو ممكن أو غير ممكن نسبيًا. وعلى الرغم من أننا نجد جميعًا أن الملاحظين في أطر مرجعية مختلفة لا يجب بالضرورة أن يتفقوا حول ترتيب أو تزامن الأحداث التي تقع في أماكن مختلفة، فإن الجميع ينبغي أن يتفقوا حول ترتيب الأحداث التي تقع في **مكان مفرد**. وعلى سبيل المثال، إذا ما أمسكت كعكة وأكلتها، فالجميع ينبغي أن يتفقوا على أنك أكلت الكعكة بعد أن التقطتها.

والآن إلى تجربتنا الذهنية. لدى آل سفينة فضاء جديدة وطويلة جدًا وهو قادم في اتجاهك بسرع هي ٩٠% من سرعة الضوء، أو $0.9\ c$. وهو موجود في منتصف سفينته، التي تكون مظلمة تمامًا فيما عدا ضوء أخضر في مقدمتها وضوء أحمر في نهايتها. افترض، كما هو موضح في الجزء الأيسر من الشكل (٣-٣)، أنك ترى الأضواء الخضراء والحمراء تومض في نفس الوقت تمامًا، تحدث هذه الومضات في لحظة مرور آل بك، بحيث ينيرك كل من الضوءين في نفس اللحظة. لاحظ أنه، أثناء الوقت القصير الذي تنتقل إليك فيه ومضات الضوء، فإن حركة آل **إلى الأمام** ستحمله إلى النقطة التي رأيت عندها حدوث الضوء الأخضر. وكنتيجة لذلك، فإن الضوء الأخضر سيصل إليه قبل الضوء الأحمر، مما يعني، أنه سيأتيه الضوء الأخضر أولا ثم الأحمر. وحتى الآن، لا ينبغي أن يكون هناك ما يدهش: لقد رأيت الوميضين في الوقت نفسه، بسبب أنك ساكن، ولكن الوميض الأخضر وصل إلى آل قبل الوميض الأحمر بسبب حركته للأمام. ولكن دعونا هنا نفكر فيما سيحدث من وجهة نظر آل، عندما يكون ثابتًا وأنت من يتحرك.



شكل (٣-٣)

يصلك النوران الأخضر والأحمر في الوقت نفسه، بينما يرى آل الضوء الأخضر ثم الأحمر. وتستنتج أنت بأن الوميضين يحدثان في الوقت نفسه، بينما يستنتج آل أن الأخضر يومض أولا.

تذكر بأن الحركة لا تستطيع التأثير في ترتيب الأحداث التي تحدث في المكان نفسه. ولذلك، ما دام أنت في مكان معين في اللحظة التي يصل إليك فيها الضوء الأخضر والأحمر، وينيرانك، فإن الجميع سيوافقون على أن الوميضين قد وصلا إليك في الوقت نفسه؛ ويشبه ذلك نفس فكرة أن الجميع يوافقون على أنك التقطت الكعكة قبل أن تأكلها. وبطريقة مماثلة، سيوافق الجميع مع آل على أن الضوء الأخضر وصله أولاً متبوعًا بالأحمر. ومهما يكن الأمر، فإن آل يعتبر نفسه ثابتًا في مركز سفينته الفضائية، بينما تقع الأنوار الخضراء والحمراء على مسافات بعيدة متساوية. لذلك، من وجهة نظره، فإن السبيل الوحيدة لتفسير وصول الضوء الأخضر إليه قبل الضوء الأحمر هو أن **الوميض الأخضر يحدث في الحقيقة أولا.** وبعبارة أخرى، فإنه سيرى الموقف كما يتضح في الجزء السفلي من شكل (٣-٣): وسيقول إن الوميض الأخضر قد حدث قبل الوميض الأحمر، وأن ذلك هو السبب أنهما قد وصلا إليك في الوقت نفسه لأنك تتحرك في اتجاه الوميض الأحمر.

ووجهات النظر الأخرى ممكنة أيضًا. وعلى سبيل المثال، فإن شخصًا ما في سفينة تتحرك في الاتجاه المعاكس (من ناحيك إطارك المرجعي) سيستنتج أن الوميض الأحمر يحدث أولا. وهكذا فإننا نرى ثلاث وجهات نظر مختلفة على الأقل بالنسبة لترتيب الأحداث. أنت تقول إن الوميضين يحدثان في الوقت نفسه، وآل يقول إن الأخضر يحدث قبل الأحمر، والمراقب الذي يتجه في الاتجاه المعاكس لك يقول إن الأحمر يحدث قبل الأخضر. من على حق؟ إن أية حركة نسبية، لذلك فإنكم جميعًا في الحقيقة على صواب. وإدراكنا العام الجديد يتطلب الاعتراف بحقيقة عدم اتفاق جميع الملاحظين على ترتيب أو تزامن الأحدث.

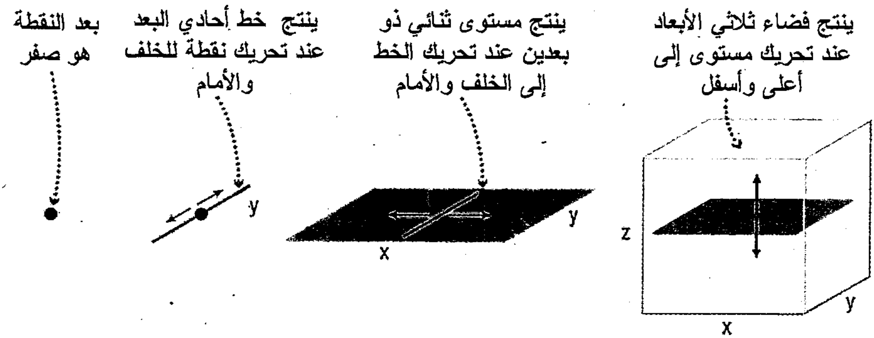
الزمكان

كل هذا الكلام حول عدم الاتفاق حول الزمن والطول والكتلة، وحول ترتيب الأحداث قد يجعلك تتعجب حول ما إذا ما كان هناك (أي شيء) غير نسبي

بعد هذا كله. ولكن هناك بعض الأنماط التي قد نرى ظهورها للعيان. فنحن نستطيع أن نعتقد بأن الطول هو مقياس للفضاء (حيث أن للفضاء طولاً، وعرضًا وارتفاعًا)، وبينما قد يختلف الزمان والمكان بالنسبة للملاحظين المختلفين، فإنهم يفعلون ذلك بطرق بالغة الدقة، متأكدين أن كل شيء يظل منسجمًا مع وجهة نظر أي ملاحظ. ولو أنك تمعنت في الأمر، فإن هذا الانسجام هو في الحقيقة تمامًا أول مطلق في النسبية، أن جميع قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة للجميع. وتذكر بأننا قد اكتشفنا كل هذه النتائج بالتركيز على المطلق الثاني، بأن الجميع يقيسون دائمًا نفس السرعة للضوء.

ولقد فحص أينشتاين وآخرون الكيفية التي تتبدى بها هذه الأفكار رياضيًا، واكتشفوا شيئًا مهمًا جدًا: أنه بينما قد تختلف بشكل مستقل قياسات المكان والزمان بالنسبة للملاحظين المختلفين، فإن الاندماج بين المكان والزمان المسمى **الزمكان** هو نفسه بالنسبة للجميع.

وحتى تفهم ما نعنيه بالزمكان ***spacetime***، فإنه ينبغي أولا أن تتعلم مفهوم **البعد** ***dimension***. ومن الممكن أن نعرف البعد بأنه عدد الاتجاهات المستقلة التي يمكن أن تسلكها الحركة. والنقطة بعدها صفر، لأن المقيد الهندسي يقتصر على نقطة لا تتجه إلى أي مكان. وتحريك نقطة للأمام والخلف في اتجاه واحد يولد خطًا. والخط هو أحادي البعد حيث يوجد اتجاه واحد فقط متاح للحركة (العودة إلى الخلف يعتبر هو نفسه مسافة بالسالب للذهاب إلى الأمام). وتحريك خط بأكمله للأمام والخلف يتولد عنه بعدان. ويكون البعدان الممكنان للحركة كما نقول، بالطول والعرض. ويتألف أي اتجاه آخر من هذين الاثنين. إذا حركنا مستوى إلى أعلى وإلى أسفل فإنه سيملأ فضاء ثلاثي الأبعاد، له ثلاثة اتجاهات مستقلة من الطول والعرض والعمق. ويلخص شكل (٣-٤) هذا الكلام.



شكل (٣-٤)

توضح هذه المخططات طريقة تكوين فضاء ثلاثي الأبعاد

نحن نعيش في مكان ثلاثي الأبعاد، ولذلك فإننا لا نستطيع تصور أي اتجاه منفصل عن الطول والعرض والعمق (أو توليفات ذلك). وعلى الرغم من أننا لا نرى أي اتجاهات "أخرى" فإن هذا لا يعني أنها غير موجودة. وإذا كنا نستطيع أن نحرك المكان للخلف والأمام في اتجاه ما "آخر"، فإننا سننتج مكانًا رباعي الأبعاد. ونحن لا نستطيع تصور مكان رباعي الأبعاد، ولكن يكون من السهل نسبيًا وصفه بطريقة حسابية. في الجبر، نقوم بحل مسائل البعد الواحد بمتغير واحد هو x، ومسائل البعدين بمتغيرين x و y ومسائل الأبعاد الثلاثة بالمتغيرات x و y و z. ومسائل الأبعاد الأربعة تتطلب ببساطة إضافة متغير رابع مثلما في x و y و z و w. ومن ناحية المبدأ نستطيع أن نستمر بالنسبة للأبعاد الخمسة، والأبعاد الستة وهلم جرًا.

ويُسمى أي مكان له أكثر من ثلاثة أبعاد: **مكان فوق الأبعاد** ***hyperspace***، وهو ما يعني ببساطة ما وراء المكان. والزمكان هو بطريقة محددة مكان فوق الأبعاد والذي تكون فيه الحركة ممكنة في الطول والعرض والعمق **والزمن**. والزمان ليس هو البعد الرابع، إنه ببساطة واحد من الأربعة. وعلى الرغم من أننا

لا نستطيع أن نتصور كل الأبعاد الأربعة للزمكان فورًا، فإننا نستطيع أن نتخيل ما ستبدو عليه الأشياء عندما يمكننا ذلك. وبالإضافة للأبعاد المكانية الثلاثة للزمكان التي نراها كالعادة، فإن كل جسم سينبسط خلال الزمن. والأجسام التي نراها ثلاثية الأبعاد في حياتنا العادية ستبدو رباعية الأبعاد في الزمكان. وإذا استطعنا أن نرى بالأبعاد الرباعية فإنه يمكننا أن ننظر خلال الزمن كما لو أننا ننظر بكل بسهولة إلى اليسار أو اليمين. وإذا نظرنا إلى شخص ما، فإننا نستطيع أن نرى كل حدث في حياته الشخصية. وإذا ما تعجبنا حول حقيقة ما وقع خلال حدث تاريخي معين فسننظر ببساطة كي نجد الإجابة.

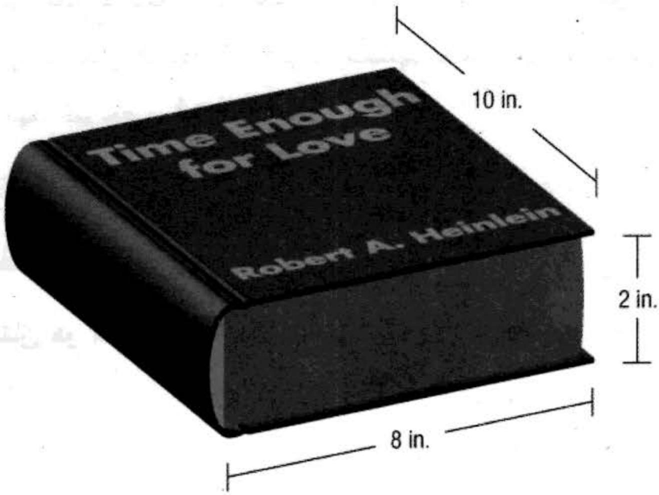
ويمدنا مفهوم الزمكان بطريقة سهلة لتفسير لماذا لا يتفق مختلف الملاحظين حول قياسات الزمن والمسافة. ولأننا لا نستطيع فورًا تصور الأبعاد الأربعة، فإننا سنستخدم تشبيهًا ثلاثي الأبعاد. افترض إنك أعطيت نفس الكتاب لأشخاص مختلفين وطلبت من كل شخص أن يقيس أبعاد هذا الكتاب. سيحصل الجميع على النتائج نفسها، ويتفقون على التركيب الثلاثي لأبعاده. افترض الآن أنك بدلا من ذلك، عرضت على كل واحد صورة ثنائية الأبعاد للكتاب بدلا من الكتاب نفسه. هذه الصور قد تبدو مختلفة تمامًا على الرغم من أنها تصور نفس الكتاب (شكل ٣-٥). وإذا اعتقد هؤلاء الناس أن الصورة الثنائية الأبعاد قد عكست الحقيقة، فربما يقيس كل واحد منهم طول الكتاب وعرضه بطريقة مختلفة ويصلون إلى نتائج متباينة حول ما يبدو عليه هذا الكتاب بالفعل. ونحن ندرك في حياتنا اليومية، ثلاثة أبعاد فقط، ونفترض أن هذا الإدراك يعكس الحقيقة. ولكن الزمكان هو في حقيقة الأمر رباعي الأبعاد. ومثلما يرى الأشخاص المختلفون صورًا مختلفة ثنائية الأبعاد لنفس الكتاب الثلاثي الأبعاد، فإن الملاحظين المختلفين يرون صورًا مختلفة ثلاثية الأبعاد لنفس الحقيقة الزمكانية. هذه الصور المختلفة هي إدراكات مختلفة للزمان والمكان من الملاحظين في أطرهم المرجعية المختلفة. ولذلك، قد يصل الملاحظون

المختلفون إلى نتائج مختلفة عندما يقيسون الوقت والطول والكتلة، على الرغم من أنهم ينظرون إلى نفس الحقيقة الزمكانية. وأستشهد بكلمات إي إف تايلور وجيه إيه ويلر في كتابهما المرجعي، **فيزياء الزمكان**:

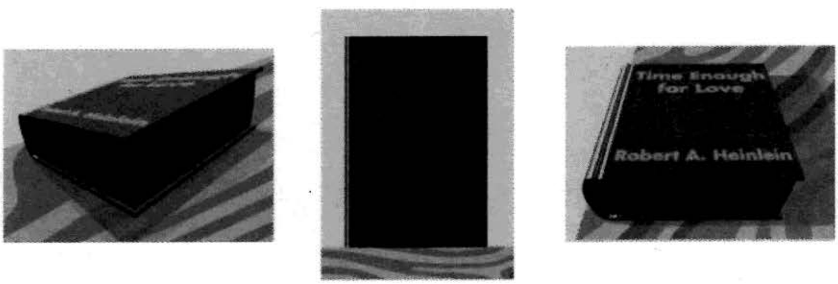
يختلف المكان باختلاف الملاحظين

يختلف الزمان باختلاف الملاحظين

الزمكان هو الشيء نفسه بالنسبة للجميع.



كتاب له بعد واضح ثلاثي الأبعاد



الصور الثنائية الأبعاد للكتاب قد تبدو مختلفة تمامًا

شكل(٣ ـ ٥)

وتمامًا مثلما يبدو الجسم الثلاثي الأبعاد مختلفًا طبقًا لصوره الثنائية الأبعاد، فإن حقيقة الجسم في الزمكان قد تؤدي إلى تقديم الملاحظين المختلفين لقياسات مختلفة عندما ينظرون إلى الزمان والمكان كل على حدة.

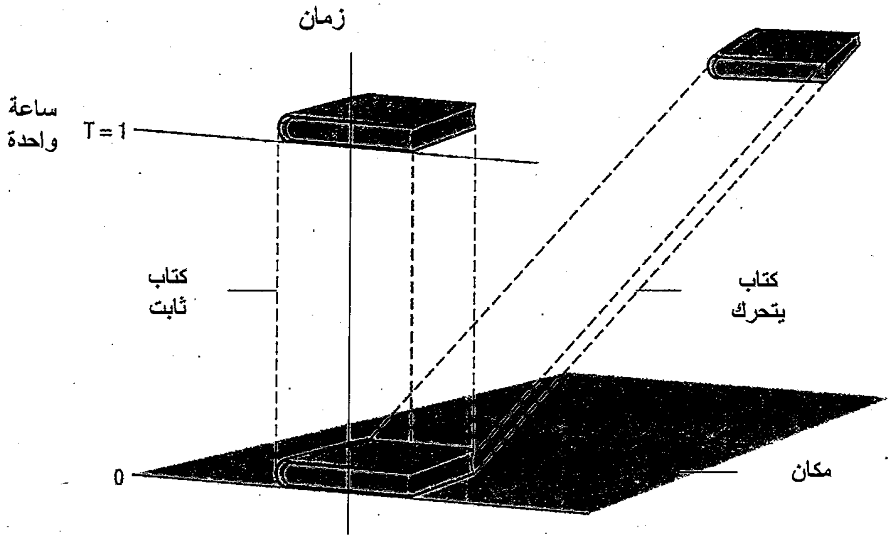
وسأضيف هنا ملاحظة أخرى موجهة أساسًا نحو القراء الذين قد يحاولون تصور المسارات الرباعية الأبعاد، والذين لا يمانعون في قليل من الرياضيات. (بمقدور الآخرين تخطي هذه الفقرة). افترض إنك وضعت نقطة عند نقطة الأصل (في منتصف) رسم بياني، ثم وضعت نقطة ثانية على مسافة ما منها، وطبقًا للاتجاهات التي سترسم بها المحورين x (الأفقي)، و y (الرأسي)، ستحصل على نتائج مختلفة لإحداثيات النقطة الثانية. ومع ذلك، وبصرف النظر عما قمت به، فإنك ستصل دومًا إلى نفس القياس **للمسافة** بين النقطتين. الذي سيكون $\sqrt{(x^2 + y^2)}$. وبالمثل فإن المسافة بين نقطة الأصل وبين أية نقطة في فضاء ثلاثي الأبعاد هي دائمًا $\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$، بصرف النظر عن اتجاه المحاور الثلاثة. وحيث إن الزمكان هو نفسه بالنسبة للجميع، فإنه يجب أيضًا أن تكون هناك "مسافة" زمكانية بين أي حدثين، التي تم الاصطلاح على تسميتها **الفترة** ***interval***، وهي دائمًا محل اتفاق الجميع بغض النظر عن كيفية قياس المكان والزمان بشكل منفرد. وربما تتوقع أن معادلة الفترة ستكون مثل المعادلات السابقة عن المسافة، ولكن بإضافة t^2 تحت الجذر التربيعي. ومع ذلك فإن معادلة الفترة ستبدو مختلفة قليلاً؛ وهي:

$\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 - t^2)}$ [١]. وتدلنا إشارة السالب على التعقيد الإضافي الذي يخص هندسة الزمكان. وعلى سبيل المثال، فبينما تكون المسافة في المنظور الثلاثي الأبعاد صفرًا إذا كانت النقطتان في نفس المكان، فإن الفترة بين حدثين يمكن أن تكون صفرًا حتى لو كانا منفصلين في الزمكان، طالما أنهما متصلان بمسار يمثل المسار الرباعي الأبعاد لشعاع الضوء. ونحن لن ندخل في تفاصيل هذه الهندسة في هذا الكتاب، ولكنك يجب أن تضعها في الحسبان عند المزيد من دراسة النسبية.

---

(١) سيلاحظ القراء الذين يميلون إلى الرياضيات أن t لها وحدات زمنية، بينما x و y و z لها وحدات طول. وحتى تكون الوحدات متجانسة فإنه من الممكن أن نستبدل t بـ ct؛ وفي هذا الكتاب سنفترض وجود هذا ضمنيًا.

يمكننا أن نمد التشابه الموجود في مثال الكتاب على استقامته للوصول إلى المزيد من التبصر حول انكماش الطول، وتمدد الزمن، وزيادة الكتلة. دعونا نحاول أن نتصور وجود كتابين في الزمكان، أحدهما ثابت في إطارك المرجعي والثاني يتحرك مبتعدًا عنك بسرعة عالية. وحتى تكون الأمور بسيطة دعونا نتصور الكتابين على مدى فترة ساعة زمنية واحدة فقط من وقتك، وأن نفترض أن كليهما أمامك في بداية هذه الساعة.



شكل (٣-٦)

إذا تصورنا كتابين خلال ساعة واحدة من الزمكان، فإن الكتاب الساكن يظل ثابتًا في المكان ولكنه يتحرك في الزمان، بينما ينتقل الكتاب المتحرك في كل من المكان والزمان.

ونحن لا نستطيع أن نتصور بشكل واضح الأبعاد الأربعة للزمكان، ولذا فإننا بدلا من ذلك، سنمثل المكان بمستوى مسطح وسنمد محور الزمان فوقه كما في شكل (٣-٦) (ويعني هذا من الناحية الفنية أننا نستطيع فقط أن نبين بعدين فقط من أبعاد الكتاب المكانية، ولكننا سنتغاضى عن هذا). الكتاب الثابت في إطارك المرجعي سيرتفع ببساطة باستقامة على محورك الزمني بـ"مسافة" ساعة زمنية. والكتاب الذي يبتعد عنك بسرعة عالية سيبدأ من المكان نفسه، ولكنه سيبتعد عنك في المكان خلال هذه الساعة الزمنية.

ولنتذكر الآن، أنه على الرغم من إقرار الجميع بالتكوين الزمكاني الرباعي الأبعاد للكتاب، فإننا نلاحظ ثلاثة أبعاد فقط في نفس الوقت. وعندما تلاحظ الكتاب الثابت فإنك ستحرك محور الزمن بمحاذاة الكتاب، ولذلك فإنك ترى – أو تقيس – أبعاده المكانية الثلاثة، وليس بعده الزمني، في تشبيهنا السابق، ويبدو الأمر بالأحرى وكأنك تنظر إلى وجه غلاف الكتاب ولذلك فإنك سترى طول الغلاف وعرضه ولكنك لن ترى سمك الكتاب. وعلى النقيض من ذلك، عندما تلاحظ الكتاب المتحرك فإنه سيبدو وكأنه يدور بزاوية ما. وكما تتسبب الصورة الثنائية الأبعاد في أن غلاف الكتاب سيبدو أصغر حجمًا في اتجاه الاستدارة، فإن الملاحظة المبنية على التصور الثلاثي الأبعاد للكتاب المتحرك ستجعل واحدًا من أبعاده المكانية أصغر، والذي هو ظاهرة انكماش الطول. وعلاوة على ذلك، فإن الاستدارة ستجعل الصورة تبين بعضًا من سمك الكتاب لم تكن قد رأيته من قبل، مما يعني أن "الاستدارة" الزمكانية ستتيح لك الآن ملاحظة جزء من البعد الزمني للكتاب المتحرك، وهي الفكرة التي تتجلي في تمدد الزمان. كل شيء على ما يرام حتى الآن، ولكن ماذا عن زيادة الكتلة؟ كان الاعتقاد دائمًا في الفيزياء السابقة على النسبية، بأن هناك مقدارين محفوظين بشكل مستقل هما: الكتلة والطاقة. وافترض العلماء أنه إذا كان لديك نظام مغلق (لا يتأثر بأية قوى خارجية)، فإن الكتلة الإجمالية ستظل كما هي، والطاقة الإجمالية ستظل دائمًا هي نفسها. ولكن النسبية

تبين أن الكتلة تتغير مع الحركة، وهو ما يعني أنه لا يمكن الحفاظ عليها بنفسها، ولكن يمكن بدلا من ذلك الحفاظ على مزيج ما من الكتلة والطاقة. ودعونا نمعن النظر في هذه الفكرة في ضوء الزمكان.

من الأرجح أن تكون من المألوف لديك فكرة أن الأجسام المتحركة لديها ما نسميه طاقة حركية؛ وكلما زادت سرعة حركة الجسم كلما كانت طاقته الحركية أكبر(١). ويعني هذا أن الفيزياء السابقة على النسبية تعتبر أن الجسم الذي لا يتحرك ليست له طاقة. وفي النسبية لا نستطيع تجاهل الوقت وجميع الأجسام تنتقل دائمًا بشكل أساسي عبر الزمن. وعلاوة على ذلك فإن الوقت ليس هو "الـ"بعد الرابع ولكنه أحد الأبعاد الزمكانية الأربعة. وليس هناك سبب للاعتقاد بأن الزمن ينبغي تجاهله عندما نأخذ طاقة الجسم في عين الاعتبار.

ولقد عمل أينشتاين من خلال هذه الفكرة (ولكن بطريقة مختلفة نوعًا ما) في معادلاته للنسبية الخاصة واكتشف بأن هناك بالفعل عنصرًا إضافيًا للطاقة، فيما وراء الطاقة الحركية *kinetic energy*، الذي لم يتم التعرف عليه مسبقًا. ووجد أن هذه الطاقة الإضافية تتجلى في الجسم المتحرك بوصفها زيادة في كتلته، ويمكن التعبير عنها في معادلة بسيطة. وما هو أكثر غرابة، أنه وجد أن ذلك يعني أن هناك طاقة مرتبطة بالانتقال عبر الزمن حتى بالنسبة للأجسام التي لا تتحرك في المكان، أي الأجسام التي في حالة ساكنة. وعلى الرغم من أننا لن نمضي في شرح ذلك في هذا الكتاب، فإن الجبر البسيط يتيح لك، ويا للعجب!، أن تحسب هذه الطاقة السكونية عن طريق معادلة زيادة الكتلة، ويتضح أن هذه المعادلة هي mc^2، حيث إن m هي كتلة الجسم الساكن (الكتلة التي تم قياسها في إطار مرجعي بحيث يكون

(١) معادلة ما قبل النسبية لطاقة الجسم الحركية هي $\frac{1}{2}mv2$ حيث m هي كتلة الجسم و v هي سرعته أو تسارعه.

ساكنًا) وc هي سرعة الضوء. وعندما نقوم بتضمين E للتعبير عن الطاقة فإننا سنصل على الأرجح إلى ما نسميه أكثر المعادلات شهرة في تاريخ العالم وهي $E=mc^2$.

وتدلنا هذه المعادلة على أنه من الممكن، على الأقل تحت ظروف معينة، أن نحول الكتلة إلى طاقة والعكس بالعكس. وعلاوة على ذلك، فإن المعامل c^2 يمثل رقمًا كبيرًا جدًا (بالوحدات القياسية، $c^2=300000000^2\ m^2/s^2$)، الذي يعني أن مقدارًا صغيرًا من الكتلة يمكن أن يسفر عنه قدر هائل من الطاقة. وعلى سبيل المثال، فإن الطاقة المنطلقة من القنابل الذرية التي استخدمت في الحرب العالمية الثانية جاءت من تحويل ما يساوي بالكاد واحد جرام من الكتلة – نحو قدر الكتلة الموجودة في دبوس الورق – إلى طاقة. وتفسر لنا المعادلة $E=mc^2$ كيفية سطوع الشمس، وذلك عن طريق تحويل جزء صغير من كتلتها باستمرار إلى طاقة من خلال عملية الاندماج النووي.

وبشكل عام، فإن $E=mc^2$ تعبر عن نوع من التكافؤ بين الكتلة والطاقة عندما يكون الجسم ساكنًا. وعليك أن تضع في اعتبارك أن تنظر إلى هذا التكافؤ بنفس الطريقة تقريبًا التي تنظر بها إلى تكافؤ المكان والزمان. وفي حين أننا ندرك أن المكان والزمان هما مجرد بعدين مختلفين للحقيقة الواحدة الزمكانية، فإنهما يبدوان مختلفين تمامًا بالنسبة لنا في حياتنا اليومية. وبالمثل، فإن الكتلة والطاقة تبدوان مختلفتين بالنسبة لنا في معظم الظروف، ونادرًا ما نلاحظ التكافؤ بينهما في حياتنا اليومية. ومع ذلك، تثبت تلك الحالات النادرة كما هو الحال مع القنابل النووية، أو سطوع النجوم، بما لا يدع مجالا للشكل أن معادلة أينشتاين الشهيرة لها تأثيرات عميقة على وجودنا. وتبين أيضًا أن نظرية النسبية الخاصة، التي عن طريقها جاءت هذه المعادلة، هي نظرية في غاية الأهمية تؤثر على الحياة اليومية لكل منا.

(٤)

إدراك عام جديد

شاهدنا في الفصلين (٢، ٣) كيف أن كل النتائج الرئيسية لنظرية النسبية الخاصة لأينشتاين تنطلق من ثابتين بسيطين: أن قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة للجميع، وأن أي واحد يقيس دائمًا نفس السرعة للضوء. ووجدنا أنك لا تستطيع اجتياز الضوء الخاص بك. ووجدنا أن الملاحظين في الأطر المرجعية المختلفة، أي في الأطر التي تتحرك بالنسبة لبعضها بعضًا، سيصلون إلى قياسات مختلفة للزمان والمكان والكتلة. وأن الملاحظين المختلفين لن يتفقوا بالضرورة على ترتيب أو تزامن حدثين يقعان في مكانين مختلفين. وشاهدنا أن كتلة الجسم الساكن وطاقته يحملان نوعًا من التكافؤ الذي وصفته المعادلة الشهيرة لأينشتاين $E=mc^2$.

وأتمنى أن تتفقوا معي أن أيًا مما ذكرنا كانت به صعوبة بارزة. وقد استطعنا تقريبًا فهم هذا كله عن طريق بعض التجارب الذهنية، وباستخدام قدر ضئيل جدًا من الرياضيات. وعلى الرغم من السهولة التي تم بها ذلك فإنك ربما ما زلت تفكر بإمعان فيه، "أليس كذلك؟". وبعد ذلك كله فإن الوصول من خلال المنطق إلى النتائج المدهشة للنسبية شيء، والادعاء بأنها تتفق مع الإدراك العام شيء آخر. ولذلك، فإنني في هذا الفصل سأحاول مساعدتك على تناول الأفكار التي تعلمتها للتو وجعلها مقبولة بقدر ما لإدراكك.

وقبل أن نبدأ، من الجدير بالذكر، أن نظرية النسبية الخاصة لا تعارض الإدراك العام كما هو شائع. وتتضح الاختلافات بين ما تعودنا عليه في حياتنا اليومية، وما تقول به النسبية فقط عندما نتعامل مع الأجسام التي تتحرك بسرعة

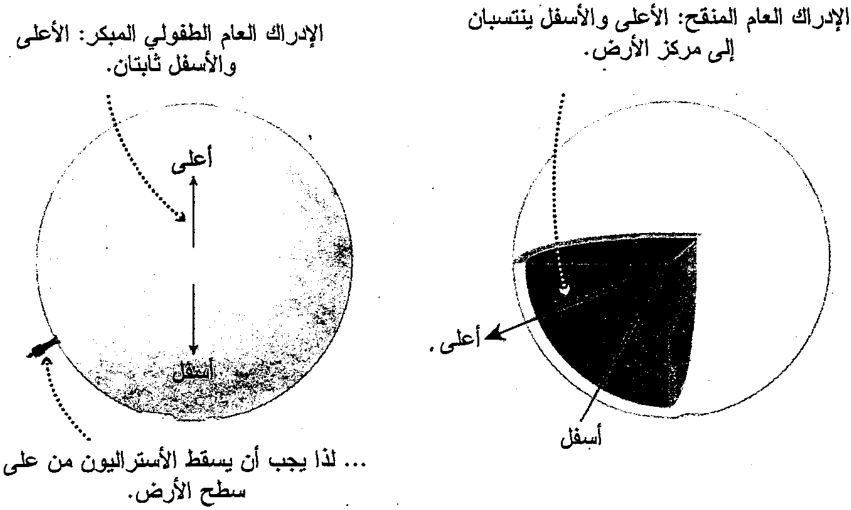
تقترب من سرعة الضوء، وتلك السرعات ليست جزءًا من التجارب اليومية المألوفة. ومن المحتمل ألا يكون بمقدورنا اكتساب إدراك عام حول الأشياء التي لا نألفها عادة.

إن المشكلة الحقيقية في إدراك النسبية هي في ميلنا إلى افتراض أن إدراكنا العام المرتبط بالسرعة المنخفضة ينبغي أن ينطبق أيضًا على السرعات العالية. فلماذا يتعين علينا أن نفكر هكذا؟ إن هناك الكثير من الحالات التي نتعلم فيها شيئًا خاصًا بظروف محددة والتي تحتاج إلى التعديل لتتوافق مع ظروف أوسع نطاقًا.

انظر في معاني "أعلى" و"أسفل". لقد تعلمت في سن مبكرة المعاني التي تتوافق مع الإدراك العام لما هو "أعلى" و"أسفل". الأعلى هو فوق رأسك، والأسفل في اتجاه قدميك، وأن الأجسام تميل إلى السقوط إلى أسفل. كان هذا الإدراك العام يسير بشكل جيد تمامًا عندما كنت صغيرًا، وما زال يسير جيدًا عند القيام بتطبيقه في منزلك أو مجتمعك. وعلى أية حال، فقد تعلمت في يوم ما، أن الأرض كروية، ورأيت كيف نستطيع أن نمثلها عن طريق نموذج كروي. وربما لا تتذكر أن ذلك قد يسبب لك في أزمة فكرية صغيرة (شكل ٤-١).

إن الإدراك المبكر حول ما هو أعلى وأسفل المرتبط فقط بخبراتك التي ترجع إلى الوجود في أجزاء صغيرة من العالم تجب مراجعته ليتوافق مع حقيقة أن الأستراليين لن يقعوا من على سطح الأرض. وبالطريقة نفسها فإن إدراكك العام حول الزمان والمكان المرتبط بالسرعة البطيئة تجب مراجعته ليتوافق مع ما تعلمنا إياه النسبية عن السرعات العالية. وعلاوة على ذلك، إذا كان النصف الشمالي للكرة الأرضية يقع في قمتها، سيخبرك إدراكك العام بوضوح أن الأستراليين ينبغي أن يقعوا من على سطح الأرض. وحيث إنك على علم بأنهم لن يقعوا منها فإنك مجبر على قبول أن إدراكك العام حول الأعلى والأسفل غير صحيح. ولذلك فإنك أعدت

النظر في إدراكك العام حتى توصلت إلى أن الأعلى والأسفل يتم تحديدهما الفعلي بالنسبة إلى مركز الأرض، وأنهما ثابتان فقط في حالة النظر إلى أجزاء صغيرة من سطح الأرض.



(شكل ٤-١)

الإدراك المبكر حول ما هو أعلى وأسفل الذي يعود إلى خبراتك في أجزاء صغيرة فقط من العالم تجب مراجعته ليتوافق مع حقيقة أن الأستراليين لن يقعوا من على سطح الأرض. وكذلك الحال، مع إدراكك العام حول الزمان والمكان بالنسبة للسرعة المنخفضة يجب مراجعته ليتوافق مع ما تعلّمنا إياه النسبية عن السرعات العالية.

ويتطلب اكتساب الإدراك الخاص بالنسبية نفس النوع من المراجعة لإدراكك العام. ويسير إدراكك العام للزمان والمكان المرتبط بالسرعات البطيئة على ما يرام إلى آخر مداه مثلما يكون عليه الحال عند التفكير في الأعلى والأسفل كمفهومين ثابتين في لعبة كرة السلة. ولكن مثلما ينبغي أن نعيد تعريف الأعلى والأسفل عند

النظر إلى الكرة الأرضية ككل، فإنك ينبغي أن تعيد تعريف الزمان والمكان إذا كنت تريد الإلمام بالمدى الكلى للإمكانية الحركية. وسيكلفك ذلك بعض المجهود الذهني، ولكنه لن يكون شاقًا. وعلاوة على ذلك فإن إدراكك العام الجديد سيتم بناؤه على إدراكك القديم، وسيظل على توافق تام مع كل شيء خبرته في حياتك اليومية.

نسبية الحركة

ومن أجل أن نبدأ بناء إدراكك العام الجديد، فإنني للأسف بحاجة إلى أن أوضح لك أن بعض نتائج النسبية قد تبدو أكثر غرابة مما كانت عليه حتى الآن. ولذلك فلنرجع إلى سفينتك الفضائية من أجل تجربة ذهنية أخرى عن السرعات العالية مع صديقك آل.

عندما تنظر إلى خارج النافذة ستشاهد آل يمضي مبتعدًا عنك بسرعة تقترب من سرعة الضوء. ونحن نعلم من تجاربنا الذهنية السابقة أنك ستقول إن الزمن عنده يجري بطيئًا وطوله انكمش وكتلته زادت. ولكننا هذه المرة نحتاج إلى أن نسأل سؤالا قد تجنبناه حتى الآن: ماذا سيكون قول آل عما يحدث؟

وكما تعلم، سيفترض آل أنه ثابت **وأنك** تتحرك مبتعدًا عنه بسرعة عالية. ولذلك، وحيث إن قوانين الطبيعة هي القوانين نفسها التي تنطبق على الجميع، فإنه يجب أن يصل من وجهة نظره إلى **الاستنتاجات نفسها** التي وصلت إليها من وجهة نظرك. وهذا يعني أنه سيقول إن الزمن يمر **عندك** بطيئًا، وإن **طولك** قد انكمش **وكتلتك** قد زادت.

وإذا كنت مثل معظم الطلاب الذين قمت بالتدريس لهم فيما مضى، فإنك قد لا تستوعب هذا جيدًا. وسيبدو الأمر بالإضافة إلى ذلك متناقضًا؛ فكيف يمكن لكليكما أن تدعيا أن الوقت يمر بطيئًا لدى الآخر؟ ولذلك فإنك مثل الآلاف من رواد

الفضاء الآخرين من قبلك، ستقرر أن تثبت لمرة واحدة وللأبد أن وقت آل هو الذي يمر بطيئًا وليس وقتك. ومن السهل عليك القيام بذلك: بمجرد أن تلتقط تلسكوبًا فائقًا وأن تلاحظ ما تسير عليه الأمور في سفينة آل الفضائية. ستجد أن وقته في الحقيقة يمر بطيئًا، وسيتجلى للعيان أن أي شيء يقوم به يسير بحركة بطيئة[1]. واستنادًا إلى هذا الدليل المرئي فإنك تبعث رسالة عبر الراديو إلى آل معلنًا اكتشافك: "أهلاً، آل! إنني أشاهدك، ووقتك يمر بالتأكيد أبطأ من وقتي".

ولأن رسالة الراديو تنتقل بالسرعة الثابتة للضوء، فلن تكون لدى آل مشكلة في تلقي رسالتك (على الرغم من انخفاض ترددها بتأثير الدوبلر، لأن آل يتحرك مبتعدًا عنك). ستستغرق الرسالة، بالطبع، القليل من الوقت لتصل إليه، ووقتًا قليلا آخر لتعود إجابته إليك. وعندما يتم ذلك، ستسمع صوته يتردد بحركة بطيئة جدًا، "هيييللللو ززززيييررزرر..."، زيادة في التأكيد على أن وقته يمر بطيئًا. ولكن عندما تقوم في النهاية بتسجيل الرسالة الكاملة التي بعثها آل، وتعيد تشغيلها على سرعة أعلى حتى تكون طبيعية، فستسمعه يقول وأنت في منتهى الدهشة: "ما الذي تتحدث عنه؟ إنني أشاهدك بتلسكوبي الفائق، وأن من يتحرك بصورة بطيئة هو **أنت**"!.

ويمكنك الاستمرار في تبادل النقاش عبر الرسائل اللا سلكية ذهابًا وإيابًا كما تشاء، ولكنك لن تصل إلى شيء. ثم تأتيك فكرة رائعة. تربط فيديو كاميرا بالتلسكوب وتسجل فيلمًا يوضح أن عقارب ساعة آل تدور أبطأ من عقارب ساعتك. تقوم بتسجيل الفيلم على أسطوانة، وتضعها في صاروخ صغير سريع

---

(١) ومرة أخرى، فإنني أتجنب حقيقة أن ما تراه قد يختلف تمامًا عما تستنتجه بعد أن تأخذ في عين الاعتبار بعض التأثيرات مثل الاختلافات في سرعة انتقال الضوء (انظر ملاحظة رقم (١٠) في الفصل الثالث). وفي هذه الحالة، فإن ما تراه يقترب مما ستستنتجه ما دام أن آل يتحرك مبتعدًا عنك، ولذلك السبب قمت باختيار هذه الوضعية لتجربتك الذهنية؛ لأنك كنت سترى شيئًا مختلفًا تمامًا إذا كان آل يتحرك في اتجاهك أو يمر بك.

وتطلقه باتجاه آل. وفكرتك أنه عندما يصل الفيلم ويشاهده، فسيكون لديه دليل مرئي بأنك على صواب وأنه يتحرك في الحقيقة بسرعة بطيئة. ولسوء الحظ، وقبل أن تعلن تمامًا انتصارك في الجدل، تعرف أن آل لديه نفس الفكرة العبقرية: بوصول صاروخ يحمل فيلمًا من صنعه. وعندما تراه، سيظهر دليل واضح على أن آل على حق، وسيبين فيلمه أنك تتحرك بصورة بطيئة!

ولا يوجد مجال للالتفاف حول هذا الأمر. وتقتضي حقيقة أن قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة للجميع أنه ما دام أنكما تطفوان في سفنكما الفضائية، فإن كل واحد منكما قد يحقّ له أن يدعي بأنه ثابت، ويجب أن يستنتج أن نفس الأشياء تحدث للطرف الآخر. ستستنتج أن زمنه يمر بطيئًا، وسيستنتج هو أن زمنك يمر بطيئًا، وسيكون الحال على هذا المنوال.

تذكرة سفر إلى النجوم

"آها!" تقول متعجبًا: "أمسكت بتلابيبك هذه المرة! إذا توقفت أنا وآل عن الحركة وبقينا معًا، فسنكون قادرين على مضاهاة الساعات، وسيتعذر على أي واحد منا أن يسجل للثاني وقتًا أقل. وعلاوة علي ذلك، لقد أخبرتنا في وقت سابق بأن عمري سيكون أقل من الذين على الأرض في رحلتي إلى الثقب الأسود. لذلك، من تريدني أن أصدقه، ما نقوله كلينا بأن وقت الآخر يمر بطيئًا، أو أن واحدًا منا يسجل بالفعل للآخر زمنًا أقل؟".

إذا كنت قد استطعت بدقة أن أخمن ما تفكر فيه، فإنك قد اكتشفت مفارقة التوأمين *twin paradox* الشهيرة في النسبية. وهي في شكلها القياسي، أن لك توأمًا مماثلا يظل على سطح الأرض بينما تقوم أنت بالسفر ذهابًا وعودة إلى نجم، بسرعة تقترب من سرعة الضوء. تقول لنا النظرية النسبية الخاصة إن استنتاجات

توأمك بالنسبة لاتجاهي الرحلة (بعد حساب آثار السفر بسرعة الضوء على ضوء ما تراه واقعيًا)، بأن الوقت يمر بطيئًا على سفينتك الفضائية، بينما قد تستنتج أنت بأن الوقت يمر بطيئًا على الأرض. ويبدو هذا مستحيلاً، حيث لا يمكن أن يصبح كل واحد منكما أصغر من الآخر عندما تلتقيان في نهاية الرحلة.

ويمثل هذا مفارقة بالفعل، ولكن هذا ما أدت إليه أيضًا حقيقة أنك فكرت بأن الناس في أستراليا سيقعون عند بداية معرفتك بكروية الأرض. وبعبارة أخرى، فإن المفارقات التي نصادفها في النسبية هي الأمور التي **تبدو** متناقضة، عندما نقوم فقط باستخدام إدراكنا العام القديم، وستبدو على ما يرام عندما نطور إدراكًا عامًا جديدًا. سنصل إلى ذلك، ولكن دعونا أولا نحل هذا التناقض.

ومفتاح هذا الحل يكمن في أن تفكر في المعنى الحقيقي لمقولة إن قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة للجميع. إذا كنت في طائرة تطير على نحو سلس فإنك ستصل إلى نفس النتائج تمامًا التي تحصل عليها من التجارب التي تجريها على سطح الأرض. ولكن إذا قمت بتجاربك أثناء إقلاع الطائرة، أو أثناء اضطراب في تحليقها، فإنك ستحصل بالتأكيد على نتائج مختلفة بسبب العوامل التي ستؤثر عليك وعلى تجاربك. ستظل قوانين الطبيعة كما هي، ولكن يوجد في هذه الحالة بعض القوى التي تؤثر عليك، التي لم تكن لتنزعج بشأنها عندما كانت الطائرة تحلق بصورة سلسة. ولذلك إذا كنت تريد مقارنة تجاربك بالتجارب التي تجريها على سطح الأرض، فإما أن تأخذ في الحسبان هذه المؤثرات الإضافية، أو أن تقوم بتجاربك في جهاز محاكاة طيران ينتج عنه نفس المؤثرات. والنتيجة العملية لهذه الحقيقة هي أنه على الرغم من أن قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة للجميع، فإن النتائج التي سيصل إليها اثنان من الملاحظين ستكون متشابهة فقط إذا كانا في أطر مرجعية متكافئة؛ وسيكون الوصول إلى نفس النتائج أكثر تعقيدًا في الحالات الأخرى.

وقد اخترنا لذلك السبب أن نتعامل مع أطر حرة عائمة، تطفوان فيها أنت وآل في حالة انعدام وزن في سفنكما الفضائية بحيث تكون ظروفكما متكافئة.

دعونا نفكر في المغزى الذى يعنيه هذا في رحلتك إلى الثقب الأسود. قلنا إنك قمت برحلتك إلى الثقب الأسود بسرعة ثابتة هي *0.99 c* في كلا الاتجاهين. ومادمت تتحرك بتلك السرعة الثابتة، فإن إطارك المرجعي سيكون مكافئًا بصورة أساسية للأرض (بإهمال تأثير جاذبية الأرض الضعيفة)، وسيكون من الصواب بالتالي أن تستنتج أن عقارب أي ساعة تتحرك ببطء على سطح الأرض. ولكننا قد تجاهلنا العديد من المسائل المهمة: كيف انتقلت سفينتك الفضائية من وضع السكون على الأرض لتصل إلى سرعة *0.99 c*، وكيف هبطت سرعتها لتدور حول الثقب الأسود، وكيف تسارعت ثانية في رحلتها للعودة، وكيف تأتى لها في النهاية أن تتوقف على سطح الأرض؟ لم نقل بالتحديد (شيئًا سوى ملاحظة أن تلك العوامل ستؤدي إلى قتلك)، ولكن من الواضح تمامًا أنك **لن** تكون في أطر مرجعية متكافئة مع الأرض أثناء تلك الفترات الخاصة بالتسارع الرهيب (أو التباطؤ). وبعبارة أخرى، فإن القواعد التي ناقشناها حتى الآن ليست كافية تمامًا لتفسير ما قد يحدث عندما تشعر بقوى التسارع.

سنتكلم لاحقًا عن الكيفية التي ستساعدنا بها النظرية النسبية العامة في إدراك مفارقة التوأمين، ولكننا قد نستطيع إدراك حلها بما فهمناه حتى الآن عن الزمكان. إن انطلاقك من الأرض في عام ٢٠٤٠ هو حدث في الزمكان، كما هو الحال مع وصولك إلى الثقب الأسود وعودتك إلى الأرض في عام ٢٠٩١. وينبغي أن يقر الجميع بحقيقة هذه الأحداث، وسيكون التساؤل الوحيد حول مقدار الوقت والمكان اللذين يفصلان بين هذه الأحداث. بالنسبة لشخص ما موجود على الأرض سيمر ٥١ سنة وستقتضي رحلة ذهابك وعودتك ٥١ سنة ضوئية. وبالنسبة لك، عند

السفر بسرعة $0.99\ c$ إلى الثقب الأسود والعودةِ منه وجدت أن ٧,٥ سنوات فقط قد انقضت، وأن المسافة التي قطعتها في رحلة الذهاب والعودة كانت ٧ سنوات ضوئية فقط. ولم يجد أي جديد عما قد تعلمناه: يختلف المكان بالنسبة للملاحظين المختلفين ويختلف الزمان بالنسبة للملاحظين المختلفين ولكن الزمكان هو نفسه بالنسبة للجميع.

والآن دعنا ننظر في ضوء تجاربك الذهنية مع آل. قد يكون من اللطيف بالنسبة لك وله أن تتجادلا عن طريق تبادل الرسائل اللاسلكية والفيديوهات حول من منكما الذي يمر وقته في الحقيقة بطيئًا. ولكن ماذا يحدث إذا اجتمعتما وقمتما بمقارنة الساعات؟ وتعتمد إجابة هذا السؤال على الكيفية التي ستجتمعان بها. ولمقارنة الساعات، تحتاجان إلى نقطة بداية ونقطة نهاية. وكنقطة بداية دعنا نختار اللحظة التي ستمر بها أنت وآل ببعضكما بعضًا، حيث يمكنكما من حيث المبدأ تبادل الساعات عند هذه النقطة. وربما تكون بمقدورك الآن رؤية المشكلة، فنقطة النهاية تتطلب أن تجتمعا مرة أخرى، ولكن ما دام أنكما مستمران في الأطر المرجعية العائمة الحرة المتكافئة الخاصة بكما، فسيرى أحدكما الآخر محلقًا في الكون بسرعة عالية للغاية، إلى غير ما رجعة. والطريقة الوحيدة التي يمكنكما أن تجتمعا بها لمقارنة الساعات ثانية هي إذا قام أحدكما بتشغيل محركاته الصاروخية (من وجهة نظر الآخر) ليتباطأ ويعود. والتفاصيل التقنية لذلك معقدة بعض الشيء، ولكن سيتضح في نهاية المطاف أن من قام بتشغيل محركاته يعاني من تأثير نفس العوامل التي تشبه إلى حد كبير تلك التي صادفتها في رحلتك إلى الثقب الأسود، وسيكون هو الشخص الذي تبين ساعته انقضاء وقت أقل.

وبمعنى آخر، تمنحنا النسبية تذكرة سفر إلى النجوم، إذا كنا نستطيع على الأقل بناء سفن فضائية قادرة على السفر بسرعة تقترب من سرعة الضوء. وقد

قمت للتو باستخدام هذه التذكرة في رحلتك إلى الثقب الأسود. ودون تمدد الوقت، كنت ستقضي الكثير من حياتك في رحلة تستغرق ٥١ عامًا من عمرك، ولكنك بفضل تمدد الزمن كنت قادرًا على القيام بالرحلة في ٧,٥ سنوات فقط. وإذا قمت بالرحلة بسرعة أعلى، فسيسمح لك التمدد في الزمن بأن تقوم بها في وقت أقل. وعلى سبيل المثال، بإضافة رقم ٩ آخر لنجعل سرعتك *0.999 c* (بدلا من *0.99 c*) فسينخفض وقت ذهابك وعودتك إلى عام واحد في كل اتجاه. وفي تلك الحالة، ستغادر الأرض في عام ٢٠٤٠ وستعود إليها أكبر في السن بعامين فقط – ولكن العودة إلى الأرض ستظل في عام ٢٠٩١ وسيظل الناس عليها يستنتجون أن تلك الرحلة تحتاج منك إلى ما يزيد قليلا على ٢٥ عامًا في كل اتجاه، بالإضافة إلى الوقت الذي تقضيه عند الثقب الأسود.

وإذا أصبحت لدينا تكنولوجيا، لبلوغك سرعة تقترب أكثر من سرعة الضوء، فسيمكنك تقريبًا القيام بأية رحلة في غضون حياتك. وعلى سبيل المثال، تبعد عنا مجرة أندروميدا *Andromeda galaxy* ٢,٥ ملايين سنة ضوئية تقريبًا، ويعني ذلك أن رحلة الذهاب والعودة لأي نجم في مجرة أندروميدا ستستغرق على الأقل ٥ ملايين سنة من وجهة نظر الناس على الأرض. ومع ذلك، إذا استطعت أن تسافر بسرعة تنقص ٥٠ جزءًا في التريليون عن سرعة الضوء (يعني هذا، بسرعة *0.99999999995 c*) فإن الرحلة ستقتضي ٥٠ عامًا تقريبًا من وجهة نظرك. ويمكنك مغادرة الأرض، وأنت في عمر ٣٠ عامًا والرجوع إليها في عمر ٨٠، ولكنك ستعود إلى الأرض التي ذهب عنها أصدقاؤك وعائلتك وكل شيء تعرفه منذ ٥ ملايين سنة.

إنها إذن أخبار سارة، وأخبار غير سارة. الأخبار السارة هي أن النسبية تقدم لنا تذكرة سفر إلى النجوم، وغير السارة أنها من ناحية الزمن، تذكرة سفر في

اتجاه واحد. يمكنك الذهاب إلى مسافة بعيدة والعودة إلى **المكان** الذي غادرته، ولكنك لن تستطيع العودة إلى الزمن الذي تركته. تفتح النسبية الكون على مصراعيه أمام أولئك الذين يرغبون في السفر إليه، ولكنه ذهاب بلا عودة.

البرهان التجريبي على النسبية

وإذا كنت ما زلت تعتقد أن كل هذا يبدو غريبًا تمامًا، فلا تنزعج – فهذا ما يفعله أي شخص آخر عندما يبدأ في دراسة النسبية. ويتطلب هذا بعض التعود، يشبه تماما ما اقتضاه تعودك على الأفكار الجديدة بالنسبة للأعلى والأسفل. وإذا كنت قادرًا على متابعة منطق التجارب الذهنية، فإنك قد قمت بأفضل ما يمكنك القيام به حتى هذه النقطة.

وقبل أن تقبل المنطق، فقد تود، بطبيعة الحال، أن تكون متأكدًا من أن كل هذا مدعوم حقًا بالدليل. وكما ناقشنا قبلاً، فإن كل المنطق الموجود في العالم ليس وافيًا بما فيه الكفاية لتكوين دليل بالنسبة للعلم، فنحن نحتاج إلى ملاحظات وتجارب حقيقية. وقد ناقشنا فعلا فيما سبق الدليل على ثبات سرعة الضوء. ولكن كيف يمكننا اختبار التكهنات الأخرى للنسبية؟

تصبح النتائج المترتبة على النسبية ملحوظة غالبًا عند السرعة العالية، ولذلك نود إجراء تجاربنا على أجسام تتحرك بالنسبة لنا بسرعة تقترب من سرعة الضوء. وربما تظن أن ذلك سيكون صعبًا، حيث **إننا** لم نستطع السفر إلى أي مكان بسرعة تقترب من هذه السرعة حتى الآن. ومع ذلك، فإنه لا يلزم أن تكون هذه الأجسام كبيرة، ومن السهل نسبيًا الحصول على جسيمات دون ذرية للوصول إلى تلك السرعة. ويقوم العلماء بهذا عن طريق آلات معروفة باسم **معجلات الجسيمات** *particle accelerators*، ومصادم الجسيمات الكبير في أوربا هو الأكثر شهرة في يومنا هذا، ولكن العلماء قد قاموا ببناء آلات مماثلة (بطاقة أقل) منذ عقود عديدة.

وقد تكون معجلات الجسيمات آلات معقدة وباهظة الثمن، ولكن الغرض الأساسي منها بسيط جدًا: يستخدمها العلماء لتسريع جسيمات دون ذرية حتى تصل إلى سرعات تقترب من سرعة الضوء، ثم تتم مصادمة الجزيئات ببعضها بعضًا، لغرض ملاحظة آثار التصادمات. وتتيح المعجلات، بهذا المعنى، العديد من التجارب المباشرة حول النسبية.

أولاً، تقدم هذه الآلات دليلا مباشرًا على عدم إمكانية تسريع أي جسم إلى سرعة الضوء: من السهل نسبيًا، أن نجعل الجسيمات تسير بسرعة ٩٩% من سرعة الضوء في معجلات الجسيمات. ومع ذلك، بغض النظر عن زيادة مدى الطاقة التي نمد بها المعجلات، فإن الجسيمات تصل جزئيًا فقط إلى سرعة تقترب من سرعة الضوء. وقد تسارعت وتيرة بعض الجسيمات إلى سرعات في نطاق ٠,٠٠٠٠١% من سرعة الضوء، ولكن أيًا منها لم يصل أبدًا لسرعة الضوء.

ثانيًا، تسمح لنا المعجلات باختبار التوقع الخاص بأن الكتلة ينبغي بيان زيادتها. وإذا كنا نفكر بمصطلحات الفيزياء السابقة على النسبية، فإن كمية الطاقة الناتجة عند اصطدام أي جسيمين تعتمد على كتلة وسرعة الجسيمين. ونحن نعرف سرعة الجسيمات المتصادمة في المعجل، ولذلك فإننا بقياس طاقة التصادم نستطيع أن نحسب كتل الجسيمات. وقد بينت النتائج أن الجسيمات قد ظهرت عليها بالفعل زيادة في كتلتها على تلك التي كانت عليه وهي ساكنة، وهي تتفق تمامًا مع المقادير التي تتنبأ بها النسبية الخاصة.

ثالثًا، تقدم المعجلات اختبارًا مباشرًا للمعادلة $E = mc^2$. وعلى الرغم من أن هذه هي المعادلة الأكثر شهرة، لتوضيح كيف يمكن أن تتحول الكتلة إلى طاقة (كما في القنابل الذرية)، فإنها تبين لنا أيضًا أنه يمكن تحويل الطاقة إلى كتلة. وهذا بالضبط ما تقوم به معجلات الجسيمات. تنتج عن التصادمات طاقة عالية التركيز،

ويتحول جزء من هذه الطاقة تلقائيًا إلى جسيمات دون ذرية جديدة. وهذا في الحقيقة هو السبب الرئيسي لسعي العلماء نحو معجلات أكثر قوة. ويمكنهم بواسطة طاقة أكبر أن ينتجوا مصفوفة كبيرة من الجسيمات الجديدة التي قد توفر رؤى جديدة نحو لبنات بناء الطبيعة. ومن وجهة نظر اختبار النسبية، فالحقيقة المجردة بأن الجسيمات يتم إنتاجها من الطاقة تؤكد توقعات معادلة الكتلة والطاقة.

رابعًا، وربما الأكثر أهمية، تستطيع المعجلات أن تمدنا باختبار مباشر لتمدد الزمن. إن معظم الجسيمات التي تنتجها طاقة التصادم لها حيوات قصيرة جدًا (أو بصيغة أكثر تقنية، فترة نصف عمر قصيرة)، مما يعني أنها تضمحل بسرعة (تتبدل) إلى جسيمات أخرى. وعلى سبيل المثال، فإن جسيمًا يسمى η^+ ("باي بلس") ميزون(*) له فترة حياة نحو ١٨ نانو ثانية (واحد على بليون من الثانية) عندما يتم إنتاجه في حالة السكون. ولكن η^+ ميزون المنتج عند سرعات تقترب من سرعة الضوء في معجلات الجسيمات يظل موجودًا فترة أطول كثيرًا من ١٨ نانو ثانية – ومقدار هذه الفترة هو المقدار الذي تتنبأ به معادلة تمدد الزمن. فالوقت يمر بطيئًا عندما تتحرك بسرعات عالية بالقياس إلينا.

وقد أثبتت تجارب أخرى آثار النسبية عند سرعات بطيئة. وعلى الرغم من أن بعض الآثار مثل تمدد الزمن يمكن ملاحظتها بصورة أسهل عند السرعات العالية جدًا، فإنها موجودة دائمًا بدرجة ما على الأقل، ولذلك يمكن قياسها بساعات على درجة كافية من الدقة. وخلال نصف القرن الماضي، استخدم العلماء أفضل الساعات المتاحة لاختبار النسبية عند سرعات متزايدة في انخفاضها. وقد تم قياس تمدد الزمن عن طريق مقارنة الساعات في المكوك الفضائي وفي طائرات بالساعات الموجودة على الأرض. وفي عام ٢٠١٠، أثبتت النتائج التي أجريت في

(*) الميزون: دقيقة ذات كتلة وسط بين البروتون والإلكترون. المترجم.

المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا في مسقط رأسي في بولدر، كولورادو، عن المقدار المتوقع لتمدد الزمن عند سرعات أقل من ١٠ أمتار في الثانية (٣٦ كيلومترًا في الساعة)، وهي سرعة أبطأ كثيرًا من سرعة راكبي الدراجات التي تجوب المدينة.

وخلاصة القول إن النسبية الخاصة هي واحدة من أكثر نظريات العلم التي تم اختبارها جيدًا، وقد اجتازت كل اختبار بنجاح ساحق. وفي العلم، لا نستطيع أبدًا أن نثبت صحة نظرية ما فوق أي شك، حيث يوجد دائمًا احتمال بإخفاقها في تجارب ما مقبلة. ومع ذلك، فإن الصرح الهائل من الأدلة الذي يدعم النظرية النسبية الخاصة لا يمكن أن ينزوي بعيدًا، وإذا استطاعت أية نظرية أخرى أن تحل محل نظرية النسبية الخاصة، فإنها يجب أن تضع في حسبانها هذا الصرح الذي يؤيد تمامًا النظرية الحالية.

أشعة الشمس وموجات الراديو

إن الدليل التجريبي المباشر للنسبية الخاصة مثير للإعجاب، ولكن هذا ليس هو أهم جزء في رأيي. فعلى وجه الخصوص، هناك اختباران غير مباشرين إلى حد ما للنسبية يلعبان دورًا حيويًا في حياتنا.

الأول هو علاقة الكتلة بالطاقة في المعادلة $E = mc^2$. فإلى جانب تفسيرها لكيفية انطلاق طاقة هائلة جدًا من القنابل الذرية، فإنها تفسر أيضًا الطاقة المنتجة في محطات الطاقة النووية، التي توفر جزءًا كبيرًا (نحو ١٠–١٥%) من الكهرباء في العالم. وعلاوة على ذلك، يفسر تحويل الكتلة إلى طاقة قدرة الشمس والنجوم على الإشراق الدائم لملايين ومليارات السنين. وبالنسبة للشمس، على سبيل المثال، يحول الاندماج النووي ***nuclear fusion*** في كل ثانية نحو ٦٠٠ مليون طن من الهيدروجين إلى ٥٩٦ طنًا من هيليوم، ويتم تحويل الـ ٤ ملايين طن الباقية إلى

الطاقة التي تسبب شروق الشمس. وبمعنى ما، فإن شروق الشمس علينا يؤكد معادلة أينشتاين الشهيرة، ولأن تلك المعادلة تأتي مباشرة من النظرية النسبية الخاصة، فإن شروق الشمس دليل على صحة النسبية.

ويتطلب الاختبار الثاني غير المباشر وجود خلفية أكبر إلى حد ما. وعلى الرغم من عدم كلامنا عنها، فقد كان الحافز الرئيسي لتطوير أينشتاين للنظرية النسبية الخاصة هو حل ما قد بدا على أنه مشكلة في المعادلات الكهرومغناطيسية التي تم اكتشافها قبل بضعة عقود. وتتضمن تلك المعادلات سرعة الضوء باعتبارها ثابتة، ولكن دون أن تلوح بأية إشارة إلى الإطار المرجعي الذي ينبغي أن يتم قياس سرعة الضوء فيه. وقبل النسبية بدا هذا في صورة مشكلة تحتاج إلى حل(١). ومع النسبية، لم تعد هذه مشكلة على الإطلاق، حيث تؤكد النسبية بأننا لسنا بحاجة إلى إطار مرجعي لقياس سرعة الضوء؛ وبدلا من ذلك، فهي دائمًا نفسها بالنسبة للجميع. وقد اتضح، وهذا هو الأكثر أهمية بالنسبة لشرحنا، أن نظرية النسبية الخاصة كلها يمكن استخلاصها من المعادلات الكهرومغناطيسية، ولكن على الرغم من إقرار بعض علماء الفيزياء بالأفكار الرياضية (وأبرزهم هندريك لورنتز، الذي تعود إليه الآن تسمية المعادلات الأساسية للنسبية الخاصة باسم "تحويلات لورنتز")، فلم يكن هناك أي واحد قبل أينشتاين قد أدرك حقًا النتائج المترتبة على هذه الحقيقة. ما سبب أهمية هذا؟ لأن هذه المعادلات هي نفسها تمامًا التي نستخدمها لتشغيل موجات الراديو، وكذلك كل الأجهزة الكهربائية الأخرى تقريبًا التي نستعملها في عالمنا المعاصر. وفي كل مرة تقوم بتشغيل جهاز

---

(١) وكان الحل المقترح الأكثر شيوعًا، هو أن الفضاء مملوء بمادة معروفة باسم الأثير، التي تتذبذب عندما مرور الموجات الكهرومغناطيسية. وقد صممت في عام ١٨٨٧ تجربة مايكلسون-مورلي للكشف عن هذا الأثير، واندهش معظم العلماء بشدة عندما لم يتم ذلك، ووجدوا بدلا من ذلك أن سرعة الضوء هي نفسها دائمًا.

التليفزيون، أو التقاط هاتفك الخليوي، أو استخدامك لجهاز الكمبيوتر فإنـك تؤكـد على صحة المعادلات الكهرومغناطيسية. ولأن تلك المعادلات تشمل ضمنيًا النسبية الخاصة، فإنها تؤكد أيضًا على صحة نظرية أينشتاين.

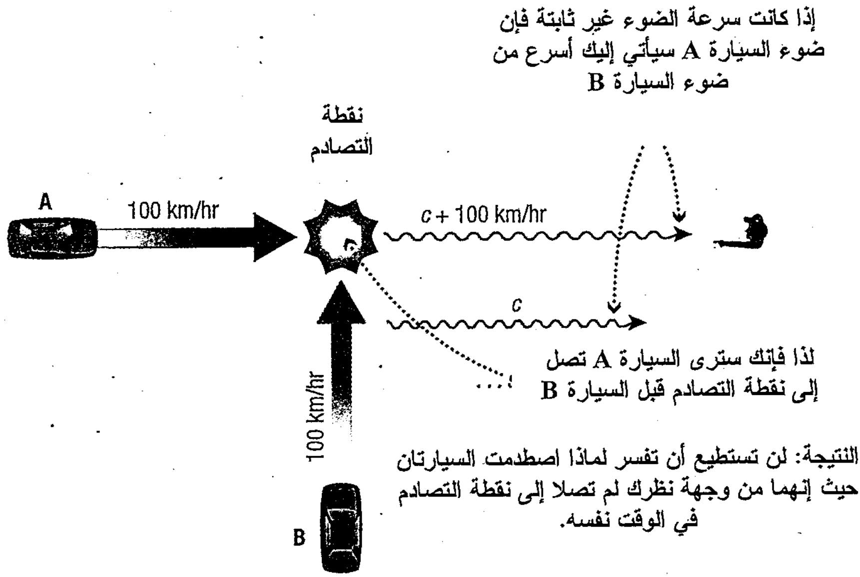
المؤامرة الكبرى

أرغب في الاعتقاد بأنني قد قمت بتقديم شرح مقنع جدًا للنـسبية الخاصـة. وأوضحت أن بداياته تنطلق من ثابتين، وصحبتك خلال سلسلة من التجارب الذهنية لتتعرف على الآثار المترتبة على تلك البدايات، وقد وصفت لك مجموعـة واسـعة من الأدلة تؤيد النظرية. ولكن كيف تتأكد من أنني لم أصطنع هذا كله؟ أسـتطيع أن أشير عليك بالعديد من الكتب الأخرى المكتوبة حول النسبية، وأستطيع أن أدلك إلى الحديث مع الفيزيائيين الذين قاموا بدراسة النسبية، ولكنك تستطيع دائمًا أن تتخيـل أننا **جميعًا** جزء من مؤامرة كبرى، مصممة من أجل تـشويش أي شـخص كـان، وبذلك يستطيع الفيزيائيون السيطرة على العالم.

ربما الأمر كذلك، ولكن قبل أن تصبح من أصحاب نظرية المؤامرة ينبغـي عليك على الأقل أن تتحقق من مقتضيات التآمر. لذا دعنا نتظـاهر للحظـة بـأن النسبية **غير** صحيحة، وأن العالم يمضي بالطريقة التي يتوقعها إدراكك العام القديم. من السهل عمل هذا. لأن النسبية الخاصة كلها تنبع من ثابتين – وحيث إن واحـدًا منهما يتعلق بأن قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة للجميع يتوافق تمامًا مع إدراكـك العام القديم – فإننا نحتاج ببساطة إلى أن نتخلص مـن الثابـت الثـاني. وبعبـارة أخرى، دعنا نفترض أن سرعة الضوء ليست ثابتة، ولكنها تضاف بدلا مـن ذلـك إلى السرعات الأخرى مثلما نتوقعه تمامًا للكرات والسيارات والطائرات.

تخيل أن سيارتين تتحركان بسرعة ١٠٠ كيلـومتر فـي الـساعة تقريبًـا، وتصطدمان عند أحد التقاطعات، كما هـو موضـح فـي شـكل (٤-٢). تـشاهد

الاصطدام عن بعد من نهاية أحد الشارعين. فإذا كانت سرعة الضوء **غير** ثابتة، فإن الضوء المنبعث من كل سيارة سيتحرك في اتجاهك بالسرعة العادية للضوء **بالإضافة** إلى السرعة التي تقترب بها السيارة نحوك. وبالنسبة إلى السيارة التي كانت تتجه مباشرة نحوك فإن الضوء المنبعث منها سيتحرك نحوك بالسرعة c + ١٠٠ كيلومتر في الساعة. والسيارة التي تتحرك عبر خطك البصري الأفقي، فإنها لا تتجه نحوك على الإطلاق، ولذلك سيأتي الضوء منها بالسرعة العادية فقط للضوء، c. ونتيجة لذلك، سترى من حيث المبدأ وصول السيارة القادمة نحوك إلى التقاطع قبل السيارة الأخرى بوقت قليل.



شكل (٤-٢)

تصادمت سيارتان عند أحد التقاطعات. إذا كانت سرعة الضوء ثابتة، فإن التصادم قد حدث بلا غموض. ولكن إذا كانت سرعة الضوء غير ثابتة، فإن الملاحظين المختلفين لن يتكشف أمامهم التصادم واضحًا بالطريقة نفسها.

وقد يبدو هذا غير مهم حتى الآن. وبعد كل شيء، فإن سرعة ١٠٠ كيلومتر في الساعة التي تسير بها السيارتان هي فقط نحو ١ على مليون من سرعة الضوء، ولذلك، إذا كنت تشاهد من نهاية أحد الشارعين، فإنك ستكون مضطرًا لقياس الفرق في وقت وصول الضوء، وسيظل التصادم فيما يبدو ملحوظًا كما تتوقعه تمامًا. ولكن ماذا لو كنت تلاحظ التصادم من مسافة بعيدة جدًا؟ وعلى سبيل المثال، تخيل أنك استخدمت تلسكوبًا فائقًا لملاحظة التصادم من كوكب آخر يبعد مليون سنة ضوئية. ولأن ضوء السيارة الأولى (السيارة القادمة نحوك) يأتي بسرعة واحد على مليون من سرعة الضوء أسرع من ضوء السيارة الثانية، عبر مسافة مقدارها مليون سنة ضوئية، فإن هذا الضوء سيصل إليك في نهاية المطاف قبل وصول ضوء السيارة الثانية **بعام كامل**.

تمعن في هذا. من وجهة نظرك، ستشاهد السيارة الأولى تصل إلى التقاطع قبل السيارة الثانية **بعام** كامل. سيخلق هذا مفارقة: فمن وجهة نظر راكبي السيارتين، فإنهم قد اصطدما، ومع ذلك فإنك قد رأيت سيارة واحدة تصل إلى نقطة التصادم قبل أن تبدأ السيارة الأخرى رحلتها! وإذا كنا نعيش في عالم توضح فيه الصور التي نراها بالضوء حقيقة ما يحدث فعلاً، فستكون الطريقة الوحيدة لتجنب هذا التناقض الظاهري أنه ينبغي علينا **ألا** نضيف سرعة السيارة إلى سرعة الضوء[1].

---

(١) ينبغي أن أشير إلى أن هذه المفارقة نفسها لم تكن لتزعجنا إذا ما كنا ننظر عوضًا عن الضوء إلى بعض الأنواع من الجسيمات (مثل النيوترونات) التي تصادف أنها انبعثت من السيارتين المتصادمتين. وفي هذه الحالة، فإننا لن نندهش إذا كان الحدث سيبدو متجليًا للعيان بشكل مختلف من وجهات نظر مختلفة، لأننا لن نتوقع أن نضع في الحسبان الطريقة التي سنضيف بها سرعة الجسيمات. وسبب انزعاجنا من التناقض مع وجود الضوء هو أننا نتوقع أيضًا أن الضوء يوضح لنا الحقيقة؛ ومن ناحية الجوهر، توضح المفارقة عدم إمكانية وجود الأمرين معًا، إضافة سرعة إلى سرعة الضوء وتبيان الحقيقة في الوقت نفسه.

يمكنك أن تلهو بهذا المنطق كما تشاء، ولكن خلاصة القول واضحة تمامًا: ففي حياتنا اليومية، نفترض أن الضوء يحمل صورًا للواقع. وإذا تصادمت سيارتان، فإننا نتوقع أن جميع الملاحظين سيرون التصادم جليًا للعيان بالطريقة نفسها، بصرف النظر عن مكانهم أو مدى بعدهم عما يلاحظونه. ولكن، كما هو واضح من تجربتنا الذهنية، فإن هذا الإجماع على ما نراه يعتمد على كون سرعة الضوء ثابتة.

لذلك إذا كان عقلك متآمرًا، فإن لك الخيار. يمكنك أن تختار رفض النظرية النسبية الخاصة، ولكنك إذا فعلت ذلك، فإنك ينبغي أن تتخلى عن شيء آخر يقودك إليه إدراكك العام، وهو أن الضوء يبين لنا كيفية تطور الأحداث في الواقع. وبدلا من ذلك، يمكنك قبول النظرية النسبية الخاصة، مع الانفتاح الذهني المترتب عليها، ولكنك ستظل مطمئنًا لمعرفتك أن ذلك لا يتضاد مع أي شيء قد دلك عليه إدراكك العام الذي يتعلق بالسرعة البطيئة في أي وقت مضى. ونظرًا لوفرة الأدلة التي ناقشناها عن النسبية الخاصة، فإنه يبدو اختيارًا سهلا.

تحقيق إدراك للنسبية

على افتراض أن قبولك للنسبية قد أصبح حقيقيًا الآن، فإنه قد حان الوقت للعودة إلى مسألة تشكيل إدراك لها. وفي الواقع، فإنه ليس لديك الكثير لتفعله. وكما قد ناقشنا، فإن النسبية ليس لها تأثير ملحوظ على ما نقوم به في حياتنا اليومية، ولا يزيد ذلك على تأثير المعاني الحقيقية للأعلى والأسفل عندما يتواثب طفل فوق سرير. لذا فإن الحِيْلة (إذا كانت هناك واحدة) لتشكيل إدراك للنسبية ينبغي أن تكون نفس الحيلة التي استخدمتها لتوسيع إدراكك العام حول الأعلى والأسفل بعدما علمت أن الأرض كروية. ويهمني أن أقول، إن ذلك مجرد اتخاذ قرار حول ما يزعجك حقًا.

بالنسبة لمعظم الناس، فإن الأفكار الأساسية للنسبية ليست مزعجة جدًا. وبعد كل شيء، فلماذا ينبغي أن تنزعج بأشياء مثل تمدد الزمن أو زيادة الكتلة إذا كانت غير ملحوظة إلا عند سرعات لن تشهدها أبدًا؟ والجزء المزعج حقًا هو عادة المفارقات، لا سيما تلك المفارقة التي واجهتنا في هذا الفصل، وكان بإمكانك أنت وآل فيها الادعاء بأن زمن الطرف الآخر يمر بطيئًا. وعلى الرغم من مناقشتنا حول ذلك التناقض، فربما لا تزال تتساءل كيف يمكن أن نجعل له معنى ممكنًا.

لتساعد نفسك على اجتياز هذه المشكلة، اذهب للخارج واسأل سؤالا بسيطًا. هل الشمس مشرقة الآن؟ دعنا نقول إنها كذلك، ولذا ستكون إجابتك "نعم". ثم، افترض أنني قررت مجادلتك وادعيت أن الشمس **غير** مشرقة. ربما تظن في البداية، أنني مجنون. ولكن افترض أنك التقطت هاتفك وكلمتني، وبدوت منطقيًا جدًا أثناء مجادلتك بأنك مخطئ حول أن الشمس مشرقة. وعندها، فكرت فكرة ذكية: استخدمت هاتفك لالتقاط صورة توضح أن الشمس بالفعل مشرقة، وأن ترسلها لي. وعندما كنت على وشك إعلان انتصارك في الجدال، فإنني أرسل لك صورة من هاتفي تبين بوضوح أن الوقت ليلا وأن الشمس غير مشرقة.

إذا كنت ما زلت طفلا صغيرًا، فستبدو هذه المجادلة لا معنى لها على الإطلاق. ومع ذلك، فإنك تعلم الآن بأن لها معنى تامًا، إذا ما حدث وكنا أنا وأنت على طرفي نقيض من الأرض، حيث يكون الوقت نهارًا بالنسبة لك وليلا بالنسبة لي. وبعبارة أخرى، فإننا نتكلم عن نفس الحقيقة المادية –أي موقع الشمس الفعلي في الفضاء– ولكننا نعطي إجابات مختلفة حول إشراقها، لأننا نلاحظها من أماكن مختلفة على سطح الأرض الكروي.

وتنشأ المجادلة بينك وبين آل بنفس الطريقة تمامًا، بسبب أنك تستخدم إدراكك العام القديم الذي تعتقد فيه أن المكان والزمان ثابتان وتتوقع أن تكون

سرعة الضوء نسبية، بمعنى أنك تتوقع إضافتها إلى السرعات الأخرى مثلما يحدث تمامًا مع سرعات الكرات والسيارات. **تخبرنا النسبية أن هذا التفكير متخلف.** إن سرعة الضوء هي الثابتة، والمكان والزمان نسبيان. وبمجرد أن تقبل هذه الفكرة البسيطة –والتي هي عبارة عن إدراكنا العام الجديد– فإن حقيقة مجادلتك أنت وآل حول وقت من يمر بطيئًا لن تصبح مدهشة أكثر من حقيقة مجادلة طفلين على طرفي نقيض من الأرض هل الوقت نهارًا أم ليلا.

وتمامًا مثلما استغرقت بعض الوقت وأنت طفل لتتعود على إدراكك العام الجديد حول الأعلى والأسفل، فإنك قد تحتاج أيضًا إلى فترة لتعتاد على إدراكك العام الجديد حول الزمان والمكان. ولكنك تعلم هدفك الآن، والذي هو أن تتشرب المقتضيات التي يفرضها ثبات سرعة الضوء، كما تشربت من قبل المقتضيات التي تفرضها كروية الأرض. وفي هذه الأثناء، حتى تصل إلى قبول إدراكك العام الجديد، تذكر أن النتائج هي المهمة، وأن كل تجربة تقوم بها، ستتوافق مع كل تجربة يقوم بها آل. إنكما تعيشان في الحقيقة الزمكانية نفسها، وستتفقان على الحقيقة التي لا لبس فيها لأية أحداث تشاهدانها. ويتجاوز هذا التطور الواضح التناقضات التي صادفتنا عندما درسنا العواقب المترتبة عند اعتبار أن سرعة الضوء غير ثابتة. ستظل النسبية الخاصة مثيرة للدهشة ولكنها في الحقيقة تجعل للكون معنى أكثر من قبل.

الجــزء الثالث

نظرية النسبية العامة لأينشتاين

(٥)

اللا معقول عند نيوتن

أعطت النظرية النسبية الخاصة لأوجه كثيرة في الكون معنى أكثر من ذي قبل، **بالإضافة** إلى أنها قد حلت أيضًا العديد من المشاكل المهمة والمعروفة جيدًا في الفيزياء، بما في ذلك المشكلة الواضحة التي تتعلق بالمعادلات الكهرومغناطيسية التي ناقشناها سابقًا. وقد عمل الكثير من الفيزيائيين على حل تلك المشاكل في ذلك الوقت، واقترب عدد كبير منهم إلى جانب أينشتاين من الحل الصحيح.

وللنظرية النسبية العامة قصة مختلفة، فقد اعتقد الكثير من مؤرخي الفيزياء أنه لولا أينشتاين لظلت غير مكتشفة لسنوات عديدة أخرى. ويتعلق السبب في نجاح أينشتاين جزئيًا إلى طريقة مقاربته للمشاكل التي لم يتم حلها بعد. وأنه بدلا من النظر إلى الحلول التي تم تقديمها، سعى إلى الحلول التي تكشف البساطة الكامنة في الكون. وبعبارة أخرى، اعتقد أينشتاين بالطبيعة الكونية البسيطة. ومن الجدير بالذكر، أنه على الرغم من مشاركة الكثير من العلماء لهذا الاعتقاد في أن للكون طبيعة أساسية بسيطة، فإنه لا يوجد سبب علمي معروف يعلل لماذا ينبغي أن يكون كذلك. وبهذا المعنى، فإنه أقرب إلى الاعتقاد الذي يرجع عادة إلى الإيمان أكثر مما يرجع إلى العلم. ومع ذلك، فإنه يظل علميًا تمامًا بطريقة رئيسية وحيدة: إذا كان الاستدلال لا يثبت أبدًا أن الطبيعة بسيطة، فإن على العلماء أن يراجعوا اعتقادهم ليتوافق مع المعطيات الجديدة.

وبينما كان معظم العلماء الآخرين عمومًا، مكتفين بالنظرية النسبية الخاصة لأنها حلت المسائل المعروفة جيدًا، فقد شعر أينشتاين أنها غير مكتملة بعد. واستمر

في تجاربه الذهنية وحساباته للبحث عن طريقة يسد بها الفجوات التي كانت، بالنسبة له، تستدعي الحل. واستغرق ذلك منه عقدًا كاملا ليستنبط كل التفاصيل، وأصبحت نتيجتها النهائية مطبوعته عن النظرية النسبية العامة في عام ١٩١٥.

وكما اتضح، فإن النظرية النسبية العامة لم تسد فقط فجوات النسبية الخاصة، ولكنها أعادت تمامًا تعريف الطريقة التي نفهم بها الجاذبية. واعتبرت أعظم إنجازات أينشتاين، وجعلت اسمه في النهاية يتردد على كل لسان.

ومن المثير للاهتمام، أنه بينما جاءت التنبؤات العديدة للنسبية العامة بوصفها مفاجأة تامة للعلماء (حتى لأينشتاين نفسه)، فإنها حلت أيضًا بعض المشاكل التي كانت معروفة في ذلك الحين بالنسبة لنظرية نيوتن القديمة عن الجاذبية. وفي الحقيقة أنها حلت مشكلة قد أرقت إلى حد كبير نيوتن نفسه أكثر من أي واحد غيره.

فعل شبحي عن بعد

إننا متآلفون جدًا مع سقوط الأشياء والتأثيرات الأخرى للجاذبية التي تغوي على التفكير في الجاذبية باعتبارها فكرة بسيطة. ولكنها ليست كذلك، عندما نستطيع أن نتحدث عن الاستجابات المصحوبة بالحرج من العلماء عندما يواجههم طفل يسأل، "ولكن **ما** الجاذبية؟". وفي غالبية التاريخ الإنساني، كان مفترضًا أنها عبارة عن شيء يعمل فقط على سطح الأرض، وتعتبر السماوات عالمًا مجهولا ومفصولا على الأرجح. ثم، في عام ١٦٦٦، أوحى هبوط تفاحة، ما قال عنه نيوتن فيما بعد إنه لحظة إلهام، والتي أدرك فجأة فيها أن القوى التي تحافظ على القمر في مداره حول الأرض هي نفس القوى التي جعلت التفاحة تسقط على الأرض. وبعد وقت ليس بالكثير، استخدم علم التفاضل والتكامل الذي استنبطه إلى حد كبير من أجل هذا الغرض، ليبين أن قوة الجاذبية ينبغي أن تؤخذ في الحسبان فيما يتعلق بالحركة المعروفة للكواكب التي تدور حول الشمس.

والقانون العام للجاذبية لنيوتن ***Newton's universal law of gravitation*** هو معادلة بسيطة تتيح لنا حساب قوة الجاذبية المتبادلة بين أي جسمين. وهو يقول إن القوة الكلية للجاذبية تتناسب طرديًا مع منتوج (حاصل ضرب) كتلتي الجسمين **وعكسيًا مع مربع** المسافة بينهما، وبعبارة أخرى، فإنك إذا ما ضاعفت المسافة بين جسمين إلى ثلاثة أمثالها، فإن قوة الجاذبية بينهما **ستهبط** (معكوس) $9 = 3^2$، تسع مرات (مربع المسافة).

وعن طريق استخدامه لقانون الجاذبية بالتزامن مع أفكاره الأخرى مثل قوانين الحركة، فقد ابتدع نيوتن **نظرية** الجاذبية وفسر مجموعة واسعة ومتنوعة من الظواهر، التي تتراوح بين سبب وجود الوزن، وسبب سقوط الصخور، ومدارات الكواكب. وتعمل هذه النظرية بشكل جيد تمامًا، على الأقل في معظم الظروف، بحيث يمكن أن يكون هناك شك قليل حول مدى صحتها. ومن بين النجاحات الأكثر إثارة، أن نظرية نيوتن للجاذبية قد استخدمت للتنبؤ بوجود ومكان كوكب نبتون قبل أن يتم اكتشافه بواسطة التلسكوب، واستخدمت لرسم المسارات التي تتخذها المركبة الفضائية حتى الهبوط في نقاط هبوط دقيقة في عوالم بعيدة.

ولكنك عندما تفكر في الأمر، ستجد شيئًا غريبًا جدًا في نظرية نيوتن للجاذبية. تأمل مدار الأرض حول الشمس. يمكننا بسهولة حساب قوة الجاذبية التي تحافظ على الأرض في مدارها، ولكن كيف تعرف الأرض بدقة أن الشمس موجودة هناك، ومن ثم فإنها ينبغي أن تدور حولها. وبعد كل شيء، فإن الأرض ليس لها حواس كالبصر والسمع ولا يوجد رابط مادي يمسك الأرض بالشمس. وكما هو بين في قانون نيوتن، فإن الجاذبية تبدو وكأنها تمارس ما أشار إليه العلماء بوصفه "تأثيرًا عن بعد"، والتي تعمل كما لو كانت أشباحًا غير مرئية تنتشر بطريقة ما أو بأخرى وفي التو واللحظة قوة الجاذبية عبر مساحات كبيرة من الفضاء. وقد كتب نيوتن نفسه:

> **إن جسمًا ما قد يؤثر خلال الفراغ على جسم آخر يبعد عنه بمسافة.. وربما ينتقل التأثير من جسم إلى آخر، هو بالنسبة لي، غير معقول إلى درجة كبيرة، بحيث إنني أعتقد بعدم وجود إنسان، لديه ملكة تفكير عقلي سليم يمكنه أن يظن هذا[1].**

ولهذا فإنك قد فهمت الآن عنوان هذا الفصل. "اللا معقول عند نيوتن" كانت نظريته الخاصة في الجاذبية. ومهما كان ما تقوم به، فقد كان واضحًا بالنسبة له أن معناها لا يستقيم تمامًا. وإذا كانت قد أزعجت الآخرين على نحو غريب، فإنهم لم يجعلوا من ذلك قضية كبيرة خلال القرنين التاليين. ولكنك تستطيع أن تراهن أنها أزعجت أينشتاين. وعندما واجه فيما بعد ادعاء ميكانيكا الكم أن الجسيم في مكان ما يمكنه في بعض الحالات أن يؤثر على جسيم موجود في مكان آخر في نفس اللحظة (فكرة "التشابك الكمي" المذكورة باختصار في فصل ٢)، فإن أينشتاين أشار بسخرية إلى هذا الادعاء باعتباره "فعلا شبحيًا عن بعد". ومع أخذ ذلك بعين الاعتبار، فإنني متأكد بأنك لن تكون مندهشًا بمعرفة أنه عندما قدم لنا أينشتاين وجهة نظر جديدة حول الجاذبية من خلال النظرية النسبية العامة، فقد ذهب إلى غير ما رجعة اللا معقول عند نيوتن الذي يتعلق بالتأثير عن بعد *action at a distance*.

مستكشفو الفضاء

إن هدفي الرئيسي في هذا الفصل والذي يليه هو أن أساعدك على فهم وجهة النظر الجديدة عن الجاذبية التي زودتنا بها النسبية العامة. ومثلما هو الحال مع

---

(١) خطاب من نيوتن، (١٦٩٢-١٦٩٣)، تم الاستشهاد به في:
J. A. Wheeler, A Journey Into Gravity and Spacetime (Scientific American Library, 1990).

النسبية الخاصة فإن هذا الفهم يجب أن تبنيه خطوة بخطوة. وفي البداية، دعونا نتأمل في تجربة ذهنية بسيطة تتضمن مستكشفين.

تخيل أنك تعتقد وكل من حولك بأن الأرض مسطحة. وتقرر، باعتبارك أحد رعاة العلم الأثرياء أن تتكفل ببعثة إلى أقصى أرجاء العالم. اخترت اثنين من المستكشفين الشجعان وأعطيتهما تعليمات دقيقة. أن يرحل كل واحد منهما في مسار مستقيم تمامًا، ولكن يجب عليهما أن يسافرا في اتجاهين متعاكسين. جهزت كل واحد بقافلة للسفر البري وبقوارب لعبور المياه، وأخبرتهما ألا يرجعا إليك ثانية إلا بعد أن يكتشفا "شيئًا استثنائيًا".

رجع المستكشفان بعد بعض الوقت. وسألتهما، "هل اكتشفتما شيئًا استثنائيًا؟". أصابتك الدهشة عندما أجابا في صوت واحد، "نعم، ولكننا اكتشفنا نفس الأشياء: لقد التقينا ببعضنا البعض، على الرغم من أننا قد سافرنا في اتجاهين متضادين على طول مسار مستقيم تمامًا".

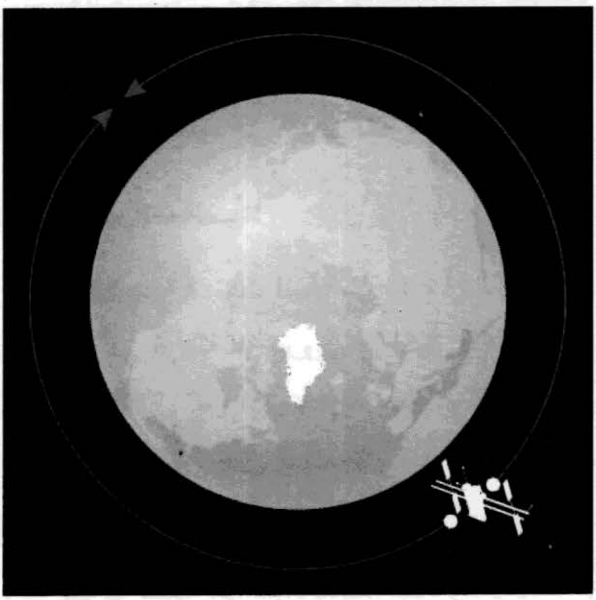
وعلى الرغم من أن هذا الاكتشاف سيكون مفاجئًا للغاية إذا كنت تعتقد حقًا أن الأرض مسطحة، ولكننا في حقيقة الأمر غير مندهشين لأننا نعلم بأن الأرض كروية. وكما هو موضح في شكل (٥-١)، فإن الخطوط المستقيمة التي اتبعها المستكشفان تنحني حول الكون، وتؤدي إلى التقائهما. وبمعنى ما، تبع المستكشفان قدر استطاعتهم **أكثر المسارات استقامة**، ولكن انحناء سطح الأرض يعني أن هذه المسارات منحنية.



شكل (٥ – ١)

على الأرض، المستكشفان اللذان يبدآن سيرهما "باستقامة" في اتجـــاهين متضادين سيجتمعان على الجانب الآخر من الكرة الأرضية. ولسنا في دهشة من ذلك، لأننا ندرك أن ذلك يعود إلى انحناء سطح الأرض.

دعونا الآن ننظر في سيناريو معاصر بعض الشيء. أنت تعوم بحرية في سفينتك الفضائية في مكان ما من الفضاء. وتأمل في معرفة المزيد عن محيطك الفضائي، فترسل اثنين من المستكشفين في مسبارين فضائيين في اتجاهين متضادين. وبصرف النظر عن الدفعة الصغيرة التي تجعلهما يبدآن، فإنهما لا يستخدمان أية محركات، ولهذا فإنهما يمضيان في خط مستقيم تمامًا مبتعدين عنك. تخيل أنك في وقت ما لاحق، وصلتك رسائل لاسلكية من المستكشفين، يخبرانك فيها بأنهما قد مرا للتو ببعضهما بعضًا! فكيف لهذا أن يحدث وقد ذهبا في اتجاهين متضادين عندما تركاك؟



شكل (٥-٢)

مسباران فضائيان انطلقا في اتجاهين متضادين في مدار الأرض، سيلتقيان بطريقة تتماثل تمامًا مع المستكشفين في شكل ٥-١، ولكننا هنا نعطي تفسيرًا مختلفًا تمامًا لالتقاء المسبارين، ونعزوه إلى "التأثير عن بعد" للجاذبية الأرضية. ولكن هل يمكن أن يكون السبب الحقيقي لذلك هو أن الفضاء ينحني بطريقة ما تشبه كثيرًا انحناء سطح الأرض؟

في الحقيقة، يمكن أن يكون هذا طبيعيًا تمامًا، إذا ما حدث وكنت تدور حول الأرض عائمًا بحرية في سفينتك الفضائية، وعلى سبيل المثال، كما يوضح شكل (٥-٢)، إذا تم إرسال مسبارين في اتجاهين متضادين من محطة فضاء فإنهما سيلتقيان في الاتجاه المقابل من الأرض. وقد كنا منذ زمن نيوتن نفسر عمومًا، المسارين المنحنيين للمسبارين بسبب التأثير الناتج عن "التأثير عن بعد" للجاذبية الأرضية: ولكن لاحظ التماثل في المسارات الموجودة في شكل (٥-١) وشكل (٥-٢). وقياسًا على رحلة المستكشفين إلى اتجاهين متضادين على الأرض، هل نستنتج بدلا من ذلك أن المسبارين يلتقيان لأن **الفضاء** منحني بطريقة ما؟ تقع تلك الفكرة في قلب النظرية النسبية العامة لأينشتاين. ولكن قبل أن نجعل لها معنى بالنسبة لك، فإننا نحتاج إلى أن نعود إلى التفكير بعمق حول نسبية الحركة.

هل النسبي في النسبية يكون دائمًا نسبيًا؟

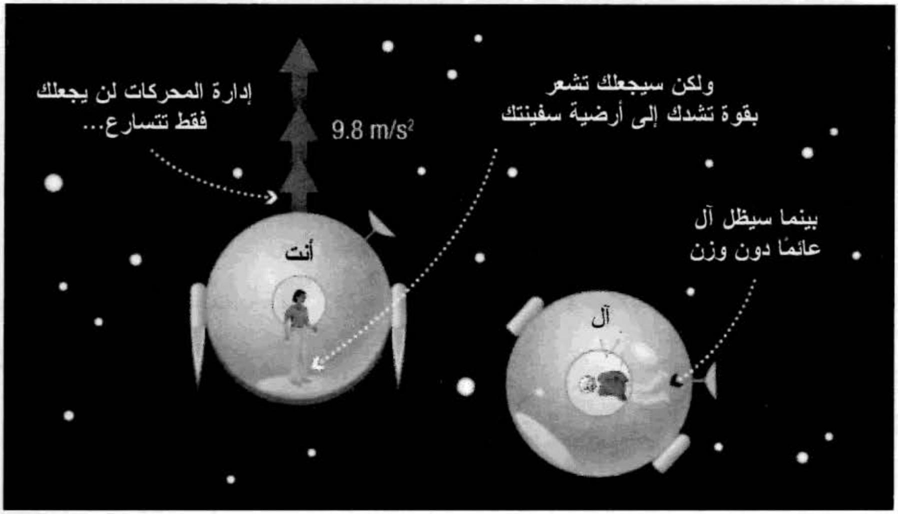
تذكر أن النظرية النسبية قد نالت اسمها من فكرة أن كل حركة نسبية. وكما أوضحنا بالنسبة للطائرة في الرحلة من نيروبي إلى كيتو (انظر شكل ٢-١)، لم تكن هناك إجابة محددة للسؤال "من الذي يتحرك حقًا؟". وكل ما استطعنا قوله إن الطائرة تتحرك **بالنسبة** للأرض، ولكن الملاحظين الموجودين في أطر مرجعية مختلفة سينظرون إلى نسبية الحركة بطريقة مختلفة.

إن فكرة أن الحركة نسبية هي فكرة بسيطة جدًا، وقد رأينا دورها أثناء تجاربنا الذهنية في الأطر المرجعية الحرة العائمة. عندما طفوتما أنت وآل بحرية في سفنكما الفضائية، استطاع كل واحد منكما أن يدعي بمشروعية أنه الشخص الموجود في حالة سكون وأن الشخص الآخر هو من في حالة حركة. ولكن ماذا لو أن أحدكما **لم** يكن يطفو بحرية، فهل تستطيعان أن تدعيا بأنكما في حالة سكون؟ دعونا نتحرى هذا.

تخيل أنك وآل تطفوان بحرية في الفضاء عندما تقرر فجأة أن تدير محركاتك الصاروخية بقوة دافعة كافية تمدك بتسارع مستمر مقداره "$1g$" الذي هو تسارع الأجسام التي تسقط باتجاه سطح الأرض. (عدديًا، $1g$ يساوي ٩,٨ أمتار على مربع الثانية). وما دام أنك تدير محركاتك، فإن آل سيرى أنك تتسارع مبتعدًا، وأن سرعتك تتزايد أكثر. ومن وجهة نظره، فإنه ما زال يطفو بحرية في وضع ساكن في سفينته الفضائية، ولذا فإنه يبعث لك برسالة لا سلكية يقول فيها، "وداعًا، أتمنى لك رحلة سعيدة!".

وإذا كانت **كل** حركة نسبية فإنه ينبغي أن تكون حرًا في ادعاء **أنك** ثابت وأن آل هو الذي يتوارى مبتعدًا عنك بسرعة متزايدة جدًا. ولذلك، فقد ترغب في الرد قائلاً، "شكرًا، ولكنى لست ذاهبًا إلى أي مكان. إنه أنت من يتوارى مبتعدًا".

ومهما يكن الأمر، فإن تشغيلك لمحركاتك قد أدخل عنصرًا جديدًا لم يكن موجودًا في تجاربنا الذهنية السابقة. وكما هو موضح في شكل (٥-٣) فإن التأثير الناتج عن تشغيل المحركات سيدفعك في اتجاه أرضية سفينتك الفضائية، مما يعني أنك لم تعد في حالة انعدام وزن. وفي الحقيقة سيتسبب تشغيل المحركات في إعطائك تسارعًا مقداره $1g$، وهذه القوة ستتيح لك أن تمشي على أرضية السفينة بوزنك الأرضي. ولذلك، إذا نظر آل بالتلسكوب إلى سفينتك الفضائية، فقد يجيبك: "أوه، نعم؟ إذا لم تكن ذاهبًا إلى أي مكان فلماذا تتسمر على أرضية سفينتك الفضائية، ولماذا تدور محركاتك؟ وإذا كنت أنا متسارعًا كما تدعي، فما السبب في كوني في حالة انعدام وزن؟".



شكل (٥-٣)

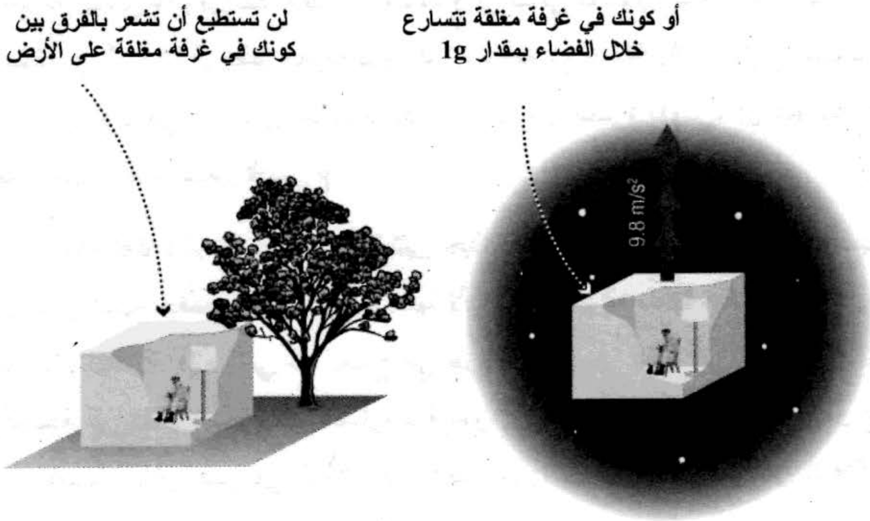
عندما كنت وآل تطفوان دون وزن، كان واضحًا أن بمقدور أي منكما الادعاء بأنه في حالة سكون بينما الآخر يتحرك. ولكنك عندما أدرت محركات سفينتك الفضائية فإنها جعلتك بتسارع (مما يعني تزايدًا في السرعة) وتتولد عنها قوة تعطيك وزنًا تقف به على الأرضية. لذلك كيف تستطيع أن تدعي أنك ما زلت ساكنًا؟

يجب أن تعترف بأن آل يسأل أسئلة جيدة جدًا. ومن المؤكد كما **يبدو** أنك فعلا من يتسارع، وفي تلك الحالة لا تستطيع أن تدعي بمشروعية أنك ساكن، وحقيقة أن آل ما زال يطفو بحرية تبدو غير متوافقة مع ادعائك أنه يتسارع، حيث إن التسارع ينبغي أن يكون مصحوبًا بقوة. ويبدو من النظرة الأولى، أن الحركة لا تعود نسبية عندما ندخل التسارع.

هذه الفكرة لم ينسجم معها أينشتاين جيدًا. فقد تراءى له أن **كل** حركة يجب أن تكون نسبية، بغض النظر عن تضمنها لأي تسارع. وإذا طبقنا هذا المفهوم على تجربتنا الذهنية، فإنه يعني أننا نحتاج إلى طريقة ما لتفسير القوة التي شعرت بها والناتجة عن تشغيل محركاتك الصاروخية دون أن نفترض بالضرورة أنك تتسارع عبر الفضاء، وأن نفسر في الوقت نفسه انعدام وزن آل بصرف النظر عن ادعائك بأنه يتسارع مبتعدًا عنك.

أسعد فكرة لأينشتاين

في عام ١٩٠٧، وبعد مجرد مرور عامين على الانتهاء من النظرية النسبية الخاصة، اهتدى أينشتاين إلى ما اسماه لاحقًا "أسعد فكرة في حياتي". وحتى تفهم فكرته السعيدة، ضع نفسك ثانية في سفينتك الفضائية المتسارعة. وبينما تتسارع خلال الفضاء بمقدار *1g*، فستكون قادرًا على أن تجلس، وتنهض، أو أن تتجول على الأرضية بوزنك الأرضي الطبيعي. وإذا قذفت كرة في الهواء فإنها من وجهة نظرك، ستهبط ثانية إلى الأرضية مثلما يحدث تمامًا على الأرض. وفي الحقيقة، إنك إذا أغلقت ستائر النوافذ، فإن كل شيء داخل سفينتك سيبدو شبيهًا في مظهره بما يحدث في غرفة منزلك على سطح الأرض (شكل ٥-٤).



شكل (٥ ـ ٤)

تؤدي تأثيرات الجاذبية والتسارع إلى نفس الشعور

وإذا كنت فيزيائيًا يعيش في زمننا، فإن ردك الأول على فكرة أينشتاين السعيدة ربما يكون "واضحًا طبعًا". ومنذ زمن نيوتن، قد كان من المعروف جيدًا أن تأثيرات الجاذبية والتسارع تؤدي إلى نفس الشعور. ولكن بالنسبة إلى أولئك العلماء الذين كانوا يفكرون بمزيد من العمق في الموضوع (وكانوا كثيرين جدًا)، فإن هذا قد بدا تزامنًا مدهشًا إلى حد كبير. انظر إلى الاكتشاف الشهير لجاليليو أن كلّ الأجسام تسقط بنفس التسارع إلى الأرض (بتجاهل مقاومة الهواء). إذا استخدمت أي نوع آخر من القوة على الأجسام التي لها كتل مختلفة، مثل تلك القوة التي تستخدمها عندما تحاول قذفها بعيدًا، فسيكون من الأكثر صعوبة تعجيل الكتل

الأكبر عن الكتل الأصغر. ولذلك فسيكون من الأصعب رمي الكرة المعدنية المستخدمة في لعبة الجلة عن كرة البيسبول. لكن عند التعامل مع الجاذبية، يتولد نفس القدر من التسارع تمامًا، بصرف النظر عن الكتلة[١].

من وجهة النظر قبل النسبية، كان الأمر يبدو وكأن الطبيعة تعرض علينا صندوقين، مكتوبًا على أحدهما "تأثيرات الجاذبية"، ومكتوبًا على الآخر "تأثيرات التسارع". هز العلماء الصندوقين ووزناهما وركلاهما ولكنهم لم يستطيعوا أن يجدوا أية اختلافات واضحة بينهما. واستنتجوا: "يا لها من مصادفة غريبة! يبدو الصندوقان متماثلين من الخارج على الرغم من أنهما يحتويان على أشياء مختلفة". وكان إلهام أينشتاين، في جوهره، أن ينظر إلى الصندوقين ويقول إنها ليست مصادفة على الإطلاق. فعلى الأصح، إن الصندوقين يبدوان متماثلين من الخارج لأنهما **يحتويان على نفس الشيء**.

هذه الفكرة الرائعة هي ما يسمى **مبدأ التكافؤ** ***equivalence principle***. إن تأثيرات الجاذبية متكافئة تمامًا مع تأثيرات التسارع[٢]. ومع هذا المبدأ، استعيدت

---

(١) رياضيًا، ينشا هذا التزامن عندما نطبق القانون الثاني لنيوتن، القوة = تسارع الكتلة، ولا تعتمد معظم القوى على كتلة الجسم؛ وعلى سبيل المثال، تعتمد القوة الكهرومغناطيسية على الشحنة، والتي ليست لها علاقة بالكتلة. ولكن عندما نستخدم الجاذبية كقوة في قانون نيوتن الثاني ***Newton's second law***، تظهر كتلة الجسم على كلا جانبي المعادلة، وبالتالي فإننا نلغيها، حيث إن تسارع الجسم لا يعتمد على كتلته. ولهذا السبب، يقال عن التزامن أحيانًا بأنه حقيقة أن "الكتلة التجاذبية" (الكتلة التي تظهر في قوة الجاذبية على الجانب الأيسر من المعادلة لقانون نيوتن الثاني) تساوي "كتلة القصور الذاتي" (الكتلة التي تظهر بجوار التسارع على الجانب الأيمن). وقبل أينشتاين، لم يكن هناك سبب معروف لماذا ينبغي أن تكون كتلة الجاذبية وكتلة القصور الذاتي لهما نفس القيمة.

(٢) من الناحية الفنية، يبقى هذا التكافؤ فقط داخل مناطق صغيرة من الفضاء. وعبر المناطق الأوسع، فإن جاذبية جسم كتلته كبيرة، مثل كوكب ستختلف في السمات عن تلك التي تحدث بسبب التسارع؛ ويفسر ذلك الاختلاف، على سبيل المثال، سبب أن الجاذبية تنتج عنها قوى المد والجزر التي لا تحدث في سفينة فضاء متسارعة.

نسبية الحركات كلها. ويمكننا أن نتأكد من ذلك عند العودة إلى أسئلة آل عندما شاهدك تتسارع مبتعدًا عنه ومحركاتك دائرة.

كان سؤاله الأول كيف تستطيع الادعاء أنك في سكون وأنت لم تعد تطفو حرًا، وبدلا من ذلك تشعر بقوة تجعل لك وزنًا على أرضية سفينتك الفضائية. وطبقًا لمبدأ التكافؤ، فإنك تستطيع أن تدعي بأنك تشعر بوزن بسبب الجاذبية. أي يمكنك الادعاء بأن المكان حولك محاط بحقل جاذبية يتجه إلى أسفل نحو أرضية سفينتك الفضائية.

وأسئلة آل الأخرى المتعلقة بالسبب في تشغيل المحركات إذا كنت ساكنًا، ولماذا هو في حالة انعدام وزن إذا كان كما تدعي يتسارع مبتعدًا عنك. يمكن الإجابة عنها الآن بسهولة. آل في حالة انعدام وزن لأنه في حالة سقوط حر خلال حقل الجاذبية[1]. ومحركاتك دائرة حتى **تمنع** سقوطك بالطريقة نفسها.

والخلاصة، إن مبدأ التكافؤ يتيح لك أن تدعي بأن الوضع يعادل ما ستكون عليه الأمور إذا كنت محلقًا فوق هاوية بينما يسقط آل إلى ما تحت حافتها (شكل٥-٥). أي أنك تستطيع أن تجيبه: "عذرًا، يا آل، ولكني سأظل أقول إن أمورك مازالت متدهورة. إنني أستخدم محركاتي لأمنع سفينتي الفضائية من السقوط، وأشعر بوزني بسبب الجاذبية. وأنت دون وزن لأنك في حالة سقوط حر. أتمنى ألا تصاب بأذى عند اصطدامك بما قد يكون موجودًا في قاع هذا الحقل من الجاذبية"!

---

(١) في حال ما إذا كنت تتساءل لماذا يعني السقوط الحر انعدام الوزن، تخيل أنك تقف فوق ميزان على منصة عالية. وما دامت المنصة سليمة، فإن قدميك ستضغطان على الميزان، وسيقوم لذلك بقراءة وزنك. ولكن إذا انكسرت المنصة وألقتك أنت والميزان منهارين إلى أسفل في حالة سقوط حر، فإن قدميك لن تظلا تضغطان على الميزان؛ مما يعني أن قراءة الميزان ستكون صفرًا، أي ستصبح لديك حالة انعدام وزن.

وعندما تنظر، بالطبع، إلى شكل (٥-٥)، فقد تظن أنها ما زالت تبدو كمشكلة: أين هو الجرف أو الكوكب الذي تنتج عنه الجاذبية التي تدعي شعورك بها. وبصورة أعم، في حين أنه من السهل أن **نقول** إن تأثيرات الجاذبية والتسارع متعادلة، فمن المؤكد أنهما لا يبدوان على نفس الشكل. وبعد كل شيء، سيبدو من الصعب أن تخلط بين شخص يقف على سطح الأرض، وآخر يندفع عبر الفضاء بسرعة متزايدة جدًا.



شكل (٥ – ٥)

تخيل أنك تستخدم محركاتك بحيث تستطيع أن تحلق فوق هاوية، بينما يقع آل بعيدًا في حالة سقوط حر. ستكون ثابتًا وستشعر بوزنك بسبب الجاذبية، بينما آل منعدم الوزن أثناء تسارعه إلى أسفل. وطبقًا لمبدأ التكافؤ، فإنك تستطيع أن تدعي أن هذا هو الوضع حتى لو لم يكن هناك أي كوكب أو هاوية.

ويأخذنا هذا الاختلاف بين المظاهر الطبيعية للجاذبية والتسارع إلى جوهر أسعد فكرة لأينشتاين. لم يقل أينشتاين فقط، إن تأثيرات الجاذبية والتسارع يبدوان متشابهين؛ وكما ناقشنا، فإن الجميع يعلمون ذلك فعلا. قال إنهما نفس الشيء. ولذلك، ووفقًا لأينشتاين إذا كانا يبدوان مختلفين، فذلك لأننا لا نرى الصورة بأكملها. ما الجزء المفقود من الصورة؟ مرة ثانية، إنه البعد الرابع للزمكان. تذكر أن الملاحظين المختلفين من الممكن أن يقيسوا الزمان والمكان بطريقة مختلفة، ولكن الزمكان هو نفسه بالنسبة للجميع. وبالطريقة نفسها تمامًا، فإن الملاحظين المختلفين من الممكن أن تكون لديهم انطباعات مختلفة حول الجاذبية والتسارع، ولكننا في الزمكان سنجدهما نفس الشيء.

التكافؤ في الزمكان

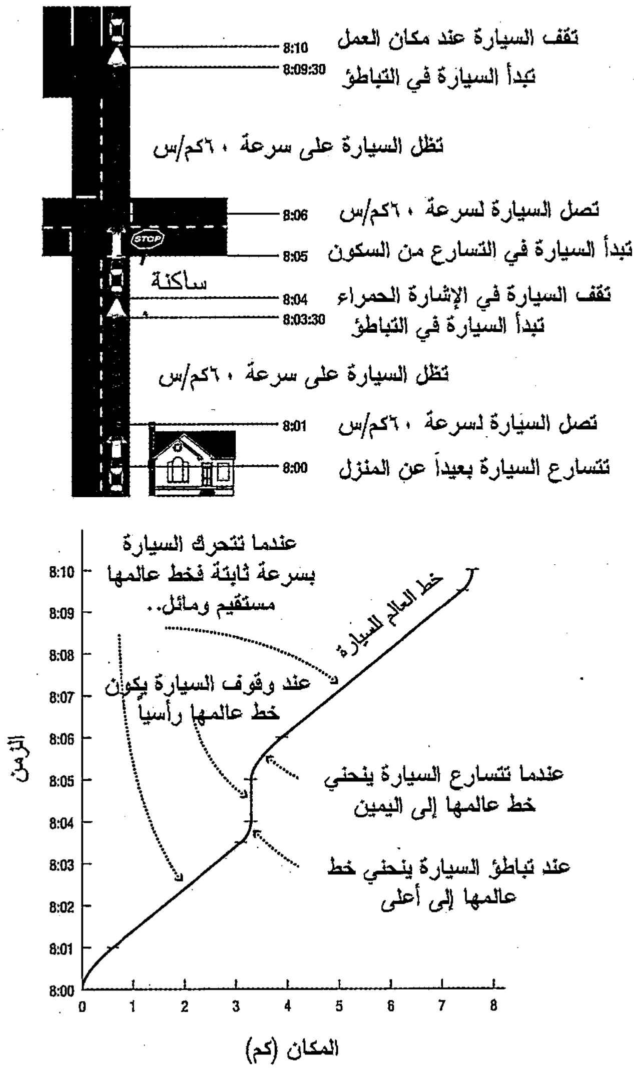
وصلنا الآن إلى جوهر النسبية العامة؛ الذى هو فهم كيفية تماثل تأثيرات الجاذبية والتسارع عند النظر إليهما في الزمكان الرباعي الأبعاد. وحتى نفعل هذا، فإننا نحتاج إلى طريقة نتصور بها أنواع المسارات المختلفة التي يمكن أن تسلكها الأجسام خلال الزمكان. دعونا نبدأ بمثال بسيط.

افترض أنك تقود سيارتك على طريق مستقيم من المنزل إلى العمل كما هو موضح في الجانب الأيسر من شكل (٥-٦). في الثامنة صباحًا، غادرت المنزل وتسارعت إلى سرعة ٦٠ كيلومترًا في الساعة. حافظت على هذه السرعة حتى وصلت إلى إشارة حمراء، وأبطأت لتقف. بعد تحول الضوء إلى الأخضر، تسارعت ثانية إلى ٦٠ كيلومترًا في الساعة، وحافظت عليها حتى تباطأت لتقف عندما وصلت إلى العمل في الثامنة وعشر دقائق.

ما الذي ستشبهه رحلتك في الزمكان؟ إذا كنا نستطيع رؤية كل الأبعاد الأربعة للزمكان، فسنرى ثلاثة أبعاد لسيارتك تتعقب مسارًا يمتد خلال عشر دقائق

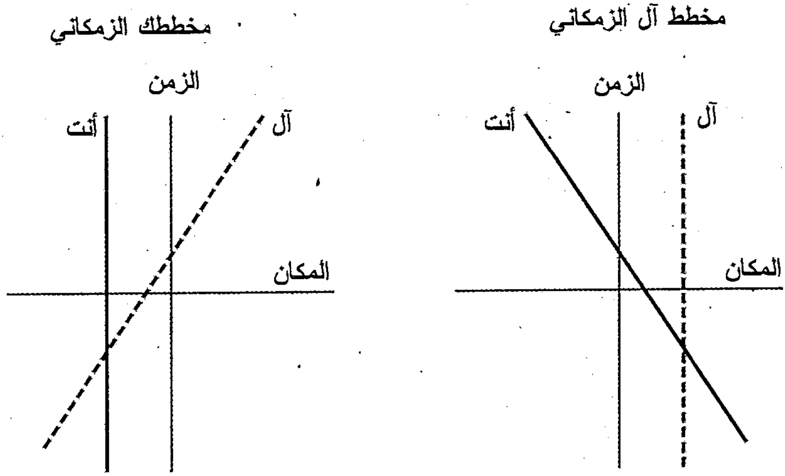
من الزمن التي استغرقتها في رحلتك. ولكننا لا نستطيع تصور الأبعاد الأربعة في الحال، ولكن لدينا في هذه الحالة وضعًا خاصًا: تقدمت رحلتك على طول بعد واحد فقط للمكان لأنك اتخذت طريقًا مستقيمًا. ولذلك، كما هو موضح في الجانب الأيمن من شكل (٥-٦)، يمكننا أن نمثل رحلتك في الزمكان بعمل رسم بياني له بعد واحد للمكان على المحور الأفقي والزمان على المحور الرأسي. ويسمى هذا النوع من الرسم البياني **مخططًا زمكانيًا** ***spacetime diagram*** ويسمى مسار الجسم خلال الزمكان **خط العالم** ***worldline***.

ويكشف مخطط الزمكان لرحلة سيارتك ثلاثة ملامح حاسمة لخطوط العالم: (١) عندما يتم إيقاف جسم (سكون) في إطارك المرجعي، فخط عالمه يكون رأسيًا؛ أي أنه لا يتحرك في المكان، ولكن يعلو في استقامة خلال الزمان. (٢) عندما يتحرك جسم بالنسبة لك بسرعة ثابتة، فخط عالمه مستقيم ولكنه مائل، لأنه يتحرك نفس المقدار من المسافة في كل وحدة من الزمن. (٣) عندما يتسارع أو يتباطأ جسم فخط عالمه يكون منحنيًا، لأن مقدار المسافة التي يتحركها يتغير عند مرور كل ثانية.



شكل (٥-٦)، (الأعلى) مخطط يوضح رحلة سيارة من المنزل إلى العمل على طول طريق مستقيم مبينًا كل الأماكن والأوقات التي تغيرت فيها حركة السيارة. (الأسفل) نفس الرحلة ممثلة على مخطط زمكاني، يمثل المحور الأفقي المكان ويمثل المحور الرأسي الزمن.

نستطيع أن نستخدم هذه الأفكار لاستكشاف نسبية الحركة. وسنبدأ بتجاربنا الذهنية عن النسبية الخاصة، والتي تطفوان فيها أنت وآل بحرية بينما يرى كل منكما الآخر في حركة نسبية. ويوضح الجانب الأيسر من شكل (٥-٧) كيف سترسم مخططًا زمكانيًا للوضع. تعتبر نفسك في سكون، ولذلك فإن خط عالمك سيكون رأسيًا، بينما خط عالم آل سيكون مستقيمًا ومائلا لأنه يتحرك بسرعة ثابتة. ويوضح الجانب الأيمن من الشكل نسخة آل من المخطط الزمكاني، الذي يكون فيه خط عالمه رأسيًا وخطك مائلاً. والحقيقة أن المخططين لهما محاور مكانية وزمانية في اتجاهات مختلفة بالنسبة لخطوط عالميكما (أنت وآل) توضح سبب اختلاف قياساتك المكانية عن قياساته، واختلاف قياساتك الزمانية عن قياساته. ولكن لاحظ إنك إذا تجاهلت المحاور التي تمثل فقط نظم الإحداثيات التي تم اختيارها تعسفيًا فسيكون المخططان في الحقيقة متطابقين: يمكنك أن تحول أحدهما إلى الآخر ببساطة عندما تدير الصفحة قليلا عند النظر إليهما. وتعني حقيقة أن المخططين متطابقان أن الواقع الزمكاني هو نفسه بالنسبة لكليكما.



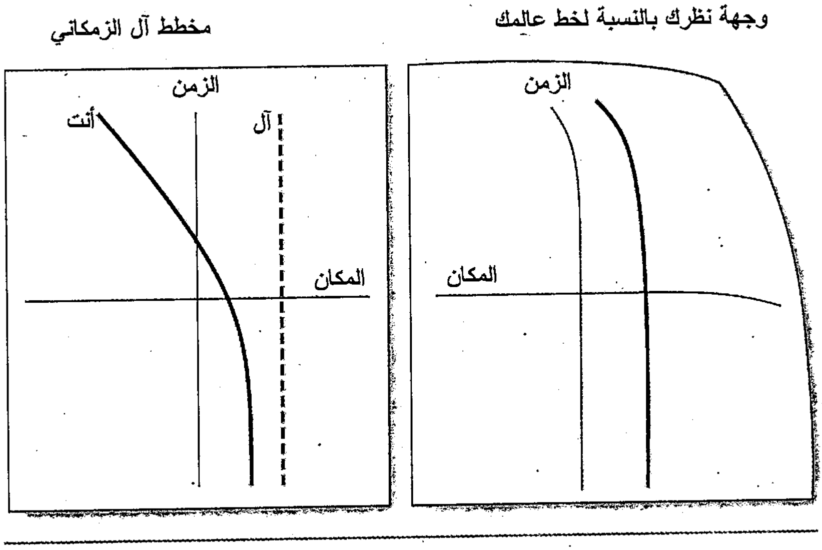
شكل (٥-٧)

عندما كنت وآل تتحركان بالنسبة لبعضكما البعض ولكنك كنت تطفو بحرية في سفينتك الفضائية، فإن مخطط آل الزمكاني هو بالضبط نفس نسخة مخططك بعد تدويره قليلا. وفي حقيقة أنكما تتفقان على أن الإزاحة النسبية لخطي عالمكما تعكس الواقع الزمكاني، في حين أن حقيقة أن كلا منكما قد وضع محاور الزمان والمكان بشكل مختلف فتفسر سبب اختلاف قياساتك للزمان والمكان.

دعونا نعود إلى تجربتنا الذهنية في هذا الفصل، الذي قمت فيها بتشغيل محركاتك، ولذا رآك آل تتسارع مبتعدًا عنه. من وجهة نظر آل، سيشبه خط عالمه تمامًا ما رسمه من قبل. ولكن في هذه الحالة، فإن تسارعك يعني أن آل سيدعي أن خط عالمك منحني، كما هو موضح في الجانب الأيسر من شكل (٥-٨). والآن، ننتقل إلى نسختك من المخطط الزمكاني. وحيث إنك تدعي أنك في حالة سكون في حقل الجاذبية، فإنك ربما ترغب في رسم خط عالمك رأسيًا، أي يشبه تمامًا ما كنت عليه وأنت في إطار الطفو الحر. استمر إذن، وارسم خطًا مستقيمًا على قطعة من الورق، مثل الخط الموضح في الجانب الأيمن من شكل (٥-٨).

والآن يأتي دورك: فوفقًا لما تعلمناه عن النسبية الخاصة، توجد حقيقة زمكانية واحدة فقط، يجب أن يتفق حولها الجميع. ولذلك، في الزمكان، يجب أن تتفقا أنت وآل على شكل خط العالم الخاص بك. وكان هذا سهلا بالنسبة للسرعات الثابتة (مثل تلك المذكورة في شكل ٥-٧)، لأنكما اتفقتما أنت وآل على أن خطا عالمكما مستقيمان؛ والأمر ببساطة أن نظرتكما كانت وفق محاور إحداثية مختلفة. ولكن كيف ستتفقان على شكل خط عالمك عندما يقول إنه منحنٍ في حين أنك رسمته كخط مستقيم؟ الإجابة ملتفة، من فضلك! - قم **بلف ورقتك**. هذه الإجابة بسيطة وماكرة جدًا، لدرجة أنني سأشرحها لك ثانية بطريقة مختلفة. إن النقطة الجوهرية هي أن هناك واقعًا زمكانيًا واحدًا فقط. وعندما نتعامل مع الخطوط المستقيمة، فإنها تكون مثل بعضها فيما عدا دورانها من واحد لآخر. ولكن المنحنيات والخطوط المستقيمة شيئان مختلفان. إذا كان خط عالمك منحنيًا في الزمكان، فهو منحني، والأمر هكذا. إن وحي أينشتاين، وأسعد أفكاره، هبط من حيث الجوهر، من فكرة أن هناك طريقتين للحصول على خط عالم منحن: يمكن أن نرسمه منحنيًا، وذلك ما فعله آل في مخططه الزمكاني، أو يمكنك أن ترسمه خطًا "مستقيمًا" على قطعة منحنية من الورق. وسيكون شكله النهائي منحنيًا في كلتا الطريقتين.

وأخيرًا، نحن مستعدون لصياغة هذا بمصطلحات مبدأ التكافؤ. من وجهة نظر آل، أن لك خط عالم منحن لأنك تتسارع خلال الزمكان الذي قد مثلناه على قطعة مسطحة من الورق. ومن وجهة نظرك، فإنك ثابت داخل حقل جاذبية، ولكن حقل الجاذبية ذاك يتسبب في أن قطعة ورقك (التي تمثل الزمكان) تنحني. وبعبارة أخرى، فإن العلة في أن تأثيرات التسارع وتأثيرات الجاذبية هما نفساهما يعودان إلى أن التسارع والجاذبية هما ببساطة طرق تبادلية لوصف المسار المنحني عبر الزمكان. أو، وحتى نعلن الاستنتاج الحاسم: **تنشأ الجاذبية من انحناء الزمكان** ***spacetime curvature***.



شكل (٥ – ٨)

(الجانب الأيسر) عند تسارعك عبر المكان، فإن خط عالمك سيكون منحنيًا عندما يرسمه آل في مخططه الزمكاني. (الجانب الأيمن) وفقًا لمبدأ التكافؤ، يمكنك أن تدعي أنك ساكن داخل حقل جاذبية، قد يؤدي إلى أن ترسم خط عالمك كخط مستقيم. فكيف إذن، سيكون بمقدورك أنت وآل الاتفاق على الواقع الزمكاني؟

وقبل أن نمضي، فإنني أحتاج تنبيهك إلى تحذير بسيط: في حين أن مثال قطعة الورق المنحنية مفيد جدًا، فإنه ليس تمثيلا كافيًا للزمكان. وكما ذكرت في فصل ٤، فإن الهندسة الحقيقية للزمكان أكثر تعقيدًا من الهندسة التي نتعلمها في المدرسة العليا، ومن الممكن أن تتولد لديك بعض الانطباعات الخاطئة إذا تعاملت مع مثال الورقة المنحنية بأكثر مما يحتمل. ومن الأكيد تمامًا أن **هناك** وسائل لتمثيل الزمكان بشكل أكثر دقة، ولكنها تحتاج إلى تقنيات رياضية (قد طور أينشتاين كثيرًا منها) وهي خارج نطاق هذا الكتاب.

ليس هناك بد من المبالغة في أهمية ما قد ناقشناه للتو. لقد أمدنا أينشتاين، من خلال مبدأ التكافؤ، بوسيلة جديدة تمامًا للنظر إلى الجاذبية.

ارجع بضع صفحات إلى الوراء، وانظر ثانية إلى مسباري الفضاء اللذين صادفناهما في شكل (٥-٢). وتخيل أنك قمت بتصوير الشكل وتكبيره، ثم قمت بلصقه على سلطانية كبيرة ومستديرة. ستظل مسارات مسباري الفضاء تمضي إلى اتجاهات متقابلة حول السلطانية، ولكنهما في هذه الحالة سيلتقيان بسبب أن **شكل السلطانية لا يترك لهم مجالا للخيار**، وليس بسبب أنك قد رسمت المسارات في صورة دوائر. ولا يشبه الزمكان الرباعي الأبعاد في الحقيقة تمامًا شكل السلطانية، ولكن الفكرة الأساسية ستظل كما هي. أي أن، الرؤية الجديدة لأينشتاين تقول إن المسبارين سيلتقيان في المدار لنفس العلة التي التقى بسببها المستكشفان على سطح الأرض: في كلتا الحالتين، فإنهما يمضيان على استقامة بقدر ما يستطيعان، ولكنهما محكومان بهندسة المكان الذي يتحركان فيه.

ومن الجدير أن نستكشف هذه الفكرة أكثر قليلا. على الرغم من أن الأرض نفسها عبارة عن جسم ثلاثي الأبعاد، فإن سطح الأرض ثنائي الأبعاد فقط، لأنه يوجد فقط اتجاهان مستقلان ممكنان للحركة: شمال-جنوب وشرق-غرب. هذا البعد الثنائي هو الذي جعل الناس ذات مرة تفكر بأن الأرض مسطحة، ولكننا لا نحتاج إن نرى الأرض من الفضاء لنتعلم العكس. ففي النسخة التي تخص الحياة الحقيقية من قصة المستكشف التي ذكرناها مبكرًا في هذا الفصل، تعلم أجدادنا أن الأرض منحنية بدراسة الملاحظة التي قام بها المستكشفون القدماء.

وقبل النسبية العامة، كنا نظن بسذاجة أن الفضاء مسطح تمام مثلما كان أجدادنا يظنون أن الأرض مسطحة. وبفضل أينشتاين، فإننا نعرف الآن أن مسابير

الفضاء تدلنا على الشكل الحقيقي للفضاء (والزمكان) بالطريقة نفسها التي أرشدنا بها المستكشفون القدماء إلى الشكل الحقيقي للأرض. وفي هذه الحالة، فإن حقيقة أن المسبارين قد التقيا في المدار تدلنا على أن الفضاء حول الأرض يجب أن يكون منحنيًا بالطريقة التي جعلت هذا الالتقاء نتيجة طبيعية لمساريهما "المستقيمين". وحقيقة أننا لا نستطيع رؤية الانحناء لا تهم؛ حيث أننا قادرون على قياسه بملاحظة المسارات الدائرية[1]. وعلاوة على ذلك، فعلى الرغم من أننا نعرف أن سبب الانحناء هو "جاذبية" الأرض، فإن المسابير ليست لديها حاجة إلى الاهتمام إذا كانت الأرض موجودة أم لا. إنها تتبع ببساطة المسارات المتاحة لها في الهيكل **الموضعي** للفضاء الذي تتحرك فيه.

ومن وجهة النظر النيوتنية القديمة، كانت الجاذبية قوة تمارس "تأثيرًا عن بعد" بين جسمين. ومع النظرية النسبية العامة، أزال أينشتاين الغموض عن هذا التأثير، وقهر الأشباح المخيفة التي ربما تكون مسؤولة عنه، وحرر اللامعقول عند نيوتن، بتوضيحه أن الجاذبية تحدث باعتبارها نتيجة طبيعة لانحناء الزمكان. ولم تعد المدارات نتيجة لقوى الجاذبية الغامضة، ولكنها فقط أكثر الطرق استقامة ممكنة خلال المناطق المنحنية للزمكان.

---

(١) بالقياس إلى حقيقة أن سطح الأرض الثنائي الأبعاد ينحني عبر الفضاء الثلاثي الأبعاد، فإنه من الطبيعي أن نتساءل ما الأبعاد "الأخرى" التي ينحني خلالها الفضاء الثلاثي الأبعاد والزمكان الرباعي الأبعاد. والجواب الذي قد يكون غير واف هو أن مثل تلك الأبعاد إذا كانت موجودة على الإطلاق، فليس لها تأثير علينا أكبر من تأثير نملة تزحف فوق سطح الأرض الثلاثي الأبعاد. أي، أننا يمكننا القيام بحساباتنا الرياضية حول الفضاء الرباعي الأبعاد دون استدعاء أو معرفة أي شيء عن أية أبعاد أخرى. وبالمناسبة، بالنسبة للقراء الملمين ببعض طرق نظريات الفيزياء الحديثة التي تقترح وجود أبعاد إضافية تحيط بمستوى دون ذري، فإن تلك الأفكار لا علاقة لها بأية أبعاد "أخرى" قد توجد وراء الزمكان.

(٦)

إعادة تعريف الجاذبية

تتطلب فكرة أن الجاذبية ناتجة عن انحناء الزمكان بعض الاستعداد للتعود عليها، خاصة وأن التصورات الوحيدة التي أمكننا القيام بها غير ملائمة إلى حد ما، فهي أمثلة ثنائية الأبعاد، مثل قطع منحنية من الورق أو مسارات دائرية حول سلطانية سلطة. ومع ذلك، فإن الاهتمام بهذه الفكرة الجديدة ينبغي أن يكون جليًا. وكما غيرت النسبية الخاصة الكون وجعلته قابلا للإدراك أكثر مما كان عليه من قبل، فكذلك فعلت النسبية العامة. وكما رأينا في فصل ٥، فقد استبعدت النسبية العامة اللامعقول عند نيوتن، وأتاحت لنا أن نتعامل مع أية حركة باعتبارها نسبية (أو، بدقة أكثر، أن نصل إلى نفس الإجابات بصرف النظر عن الإطار المرجعي الذي نختاره، وهي فكرة في النسبية تسمى "التباين المشترك العام")، وهي تفسر لنا ما قد بدا وكأنه تزامن مدهش بين آثار الجاذبية وآثار التسارع بوصفه نتيجة للبساطة الكامنة في الطبيعة.

ومن وجهة النظر التاريخية، فإن أصعب مهمة واجهت أينشتاين بعد تطوير مبدأ التكافؤ هي إيجاد وسيلة ليجعل العلماء الآخرين يقبلون به. وبعد كل شيء، فإن تاريخ العلم يتناثر به ركام من أفكار لطيفة كانت تبدو مقبولة في وقتها، وحقيقة أن مبدأ التكافؤ كان فقط "أسعد فكرة" لأينشتاين غير كافية لأن تعطيه مشروعية علمية. وكان ما يلزم أينشتاين هو وصف كامل مبني على أسس رياضية للجاذبية قائم على مبدأ التكافؤ. وعلاوة على ذلك كان ضروريًا أن يبين أن نظريته ستستنبط بعض التنبؤات الكمية المختلفة عن استنتاجات نظرية الجاذبية لنيوتن، لذلك فإن

الملاحظات أو التجارب الفعلية هي التي تستطيع اختبار ما إذا كانت نظريته الجديدة سيكون أداؤها أفضل من القديمة أم لا.

هذا الاحتياج إلى الدقة الرياضية هو الذي يفسر إلى حد كبير لماذا استغرق أينشتاين ثمان سنوات منذ التفكير لأول مرة في مبدأ التكافؤ حتى قيامه بنشر النظرية العامة للنسبية. وكانت المشكلة الرئيسية هي اكتشاف أن إجراء العمليات الحسابية استنادًا لمبدأ التكافؤ، يحتاج إلى متطلبات رياضية أكثر بكثير من الحسابات التي كانت لازمة للنسبية الخاصة. خصوصا، أنه في حين يمكن استخلاص جميع النتائج الرئيسية للنظرية النسبية الخاصة عن طريق بعض الجبر البسيط، فإن القيام بعمليات حسابية للزمكان المنحني الرباعي الأبعاد يتطلب استخدام فروع غير معروفة للرياضيات لم يكن قد تم استكشافها بالكامل قبل أينشتاين. وفي الواقع، يشبه هذا كثيرًا نفس السبب الذي اضطر نيوتن إلى استنباط حساب التفاضل والتكامل ليثبت نظريته في الجاذبية، وعليه تطلبت حسابات النسبية العامة اختراع تقنيات رياضية جديدة.

ونحن لن نتناول الرياضيات التي تتعلق بالنسبية العامة في هذا الكتاب، ولكن هناك ثلاثة أسباب على الأقل تدفعني إلى الاعتقاد بأنه من الضروري أن تكون واعيًا بوجود هذه الرياضيات. أولاً، إن أمثلتنا لن تكون وافية، ولكن يجب تخفيف أية مخاوف لديكم من خلال معرفة أن النظرية الفعلية ترتكز على أساس رياضي متين. ثانيًا، لقد اكتشفت أن كثيرًا من الناس يقللون من أهمية الرياضيات للعلوم؛ في حين أن العلم يرتكز على أفكار، ويتطلب الاحتياج إلى اختبار الأفكار، على الأغلب تقريبًا، إلى ضرورة وجود وسائل رياضية لتقييمها. ثالثًا، آمل أن يحث هذا بعض القراء من الشبان على المضي قدمًا إلى أبعد مما نغطيه في هذا الكتاب، وأريد أن تكون على دراية بأن هذا يعني أنك ستحتاج إلى إيلاء عناية خاصة لدراسة الرياضيات.

وبعد ما ذكرناه، فإنه قد حان الوقت لكي نتأمل بعمق في أهمية العبارة التي تقول "تنبثق الجاذبية من انحناء الزمكان". سنبدأ من خلال النظر في الشروط التي تتيح انعدام الوزن في الزمكان، ثم نستخدم رؤيتنا لمعرفة السبب الكامن وراء انحناء الزمكان.

أكثر استقامة ممكنة للمسارات

أتذكر أنك وآل كنتما منعدمي الوزن عندما كنتما تتحركان بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضكما بعضًا في عمق الفضاء، وسمح التماثل في ظروفكما أن يدعي كل منكما أنه الوحيد الموجود في حالة ثبات. ولكن عندما أدرت محركاتك، فإن هذا التماثل قد تصدع لأنك شعرت بوزنك بينما ظل آل منعدم الوزن. وحتى تستمر في الادعاء بأنك في حالة سكون، فقد اضطررت إلى الاستعانة بمبدأ التكافؤ، قائلا إنك شعرت بالوزن بسبب الجاذبية، وأن آل كان منعدم الوزن لأنه كان في حالة سقوط حر. وبالطبع، فإن آل استمر في ادعائه بأنه منعدم الوزن نتيجة لكونه في حالة سكون في عمق الفضاء.

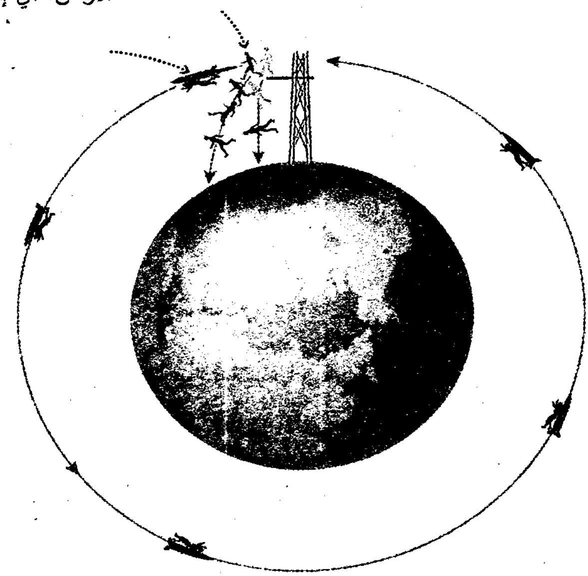
لاحظ أنك وآل تتفقان على أنك في حالة وزن، ولكنكما تختلفان فقط في تفسيرك لها. وطبقًا لمبدأ التكافؤ، فإن وجهتي نظركما يجب أن تصف الحقيقة الزمكانية نفسها، التي تعني أن المسار الزمكاني لجسم يطفو في عمق الفضاء ينبغي أن يكون هو نفسه مماثلا للجسم في حالة سقوط حر. والآن، وبقدر ما بذلنا في اكتشاف كيفية تبدي الجاذبية والتسارع بالصورة نفسها، فإنه يجب علينا أن نسأل ما الصورة "نفسها" بالنسبة لمسارات الأجسام في الفضاء العميق والأجسام التي في حالة سقوط حر.

وقد يكون من الغريب، أننا نستطيع أن نجد الإجابة عند النظر إلى وضع آخر تكون فيه الأجسام في حالة انعدام وزن، وهو ما يحدث عندما نكون في

مدار. والعلة في أن رواد الفضاء على متن المحطة الفضائية منعدمي الوزن هي أنهم يكونوا باستمرار في حالة سقوط حر نحو الأرض. ويمكنك رؤية السبب إذا تخيلت برجًا طويلا جدًا (شكل ٦-١). إذا خطوت ببساطة خطوة واحدة من البرج، فإنك ستسقط مباشرة إلى أسفل، ولكنك إذا ما ركضت وقفزت فإنك ستستقر على بعد مسافة قصيرة. وكلما ركضت أسرع، فإنك ستصل إلى مسافة أبعد قبل السقوط. وإذا استطعت بطريقة ما أن تركض بسرعة كافية – نحو ٢٨,٠٠٠ كيلومتر في الساعة (١٧,٠٠٠ ميل في الثانية) على ارتفاع المحطة الفضائية – فإن شيئًا مثيرًا جدًا سوف يحدث: بمرور الوقت ستكون الجاذبية قد شدتك إلى أسفل بمقدار طول البرج، واقتربت بما فيه الكفاية من محيط الأرض بحيث لن يستمر سقوطك إلى الأبد. بدلا من ذلك، ستظل مرتفعًا تمامًا فوق الأرض طول الوقت ولكنك جزء من المسار حول الأرض. وبعبارة أخرى، فإنك إذا تحركت بسرعة عالية بما فيه الكفاية، فإنك ستستمر في "السقوط حول" الأرض إلى الأبد، وهو الشيء الذي يماثل كما لو كنت في مدار.

تذكر الآن، من الفصل السابق أن الأجسام الموجودة في مدار تشبه بشكل ما كرات زجاجية في سلطانية، تتبع مساراتها خلال الزمكان المنحني بصورة مستقيمة بقدر ما يسمح لها الشكل الهندسي الموجودة فيه؛ ونشير إلى هذه المسارات بوصفها "أكثر استقامة ممكنة"، حيث إن الشكل الهندسي الذي تدور فيه يمنعها من أن تسير فعليًا باستقامة. ولأن كل مسارات السقوط الحر يجب أن تكون متكافئة في الزمكان، فإننا نستنتج أن كل تلك المسارات يجب أن تمثل أجسامًا تتبع أكثر المسارات استقامة ممكنة بين نقطتين في الزمكان. وبعبارة أخرى، بسبب أن مبدأ التكافؤ يقول إن الطفو في عمق الفضاء يعادل السقوط الحر، فإن الخاصية الزمكانية المشتركة لأي مسار يكون فيه منعدم الوزن هو ذلك المسار الذي يطلق

عليه **أكثر** المسارات **استقامة ممكنة**. وحينما تشعر بوزنك مثلما يحدث عندما تدير محركاتك الصاروخية أو تقف على سطح الأرض، – فإن مسارك لن يكون أقصر المسارات استقامة ممكنة.



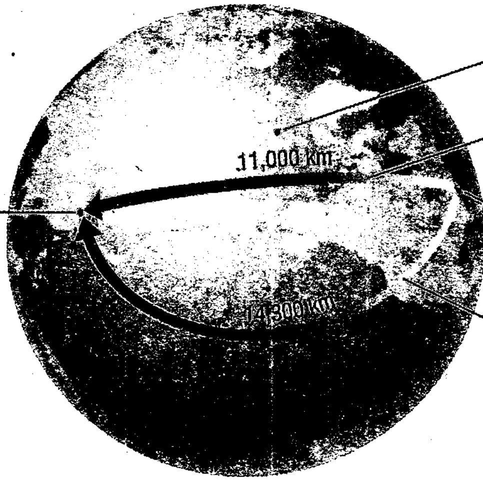
شكل (٦-١)

يوضح هذا التخطيط لماذا يمثل المدار حالة من حالات السقوط الحر. مقتبس من تخطيط مماثل في:

Jeffrey Bennett, Megan Donahue, Nick Schneider, and Mark Voit, The Cosmic Perspective, 7th ed. (2014).

والذي هو بدوره مقتبس من تخطيط مماثل في:

Space Station Science, by Marianne Dyson.



شكل (٦-٢)

يوجد عديد من المسارات بين فيلاديلفيا وبكين، ولكن طريق الدائرة الكبرى هو أقصرها وأكثرها استقامة. وكل الطرق الأخرى مثل الطريق الذي يمر بانتظام عبر خط العرض هي طرق أطول وأكثر انحناء.

وقد يساعدنا تشبيه ما في تلخيص الذي توصلنا إليه. كما هو موضح في شكل (٦-٢)، فإن مدينتين هما بكين وفيلاديلفيا كليتهما على خط عرض ٤٠ درجة شمالا ولكنهما تبعدان عن بعضهما طوليًا بمقدار نصف محيط الكرة الأرضية تقريبًا. ولذلك، فإن أقصر المسارات وأكثرها استقامة ممكنة بينهما هو مسار الدائرة الكبرى (بمعنى المسار الذي يقسم الكرة الأرضية إلى نصفين إذا مددناه على استقامته)، والذي يمر تقريبًا فوق القطب الشمالي. يوجد عديد من المسارات الممكنة الأخرى بين المدينتين، ولكن كل مسار آخر سيكون أطول وأكثر انحناء من أكثر المسارات استقامة ممكنة. وعلى نفس المنوال، يوجد العديد من المسارات

الممكنة بين أية نقطتين معينتين في الزمكان. ولكن مسارًا واحدًا فقط هو أكثر المسارات استقامة ممكنة، وذلك المسار هو الوحيد الذي ستكون فيه في حالة انعدام وزن.

وجهة نظر جديدة بالنسبة للجاذبية

إن حقيقة أن المدارات تمثل المسارات الأكثر استقامة ممكنة خلال الزمكان مفيدة جدًا. وتعني أنه على الرغم من أننا لا نستطيع أن **نرى** انحناء الزمكان، فإننا نستطيع تصور مخططه بملاحظة مسار المدارات. ولقد قمنا بعمل ذلك في حالة واحدة، هي تلك التي استخدمنا فيها مسار المسبارين لنستدل على أن المكان ينحني في الفضاء المحيط بالأرض، مما يؤدي إلى أن المسبارين يمضيان في جولة بعد أخرى في مدارها.

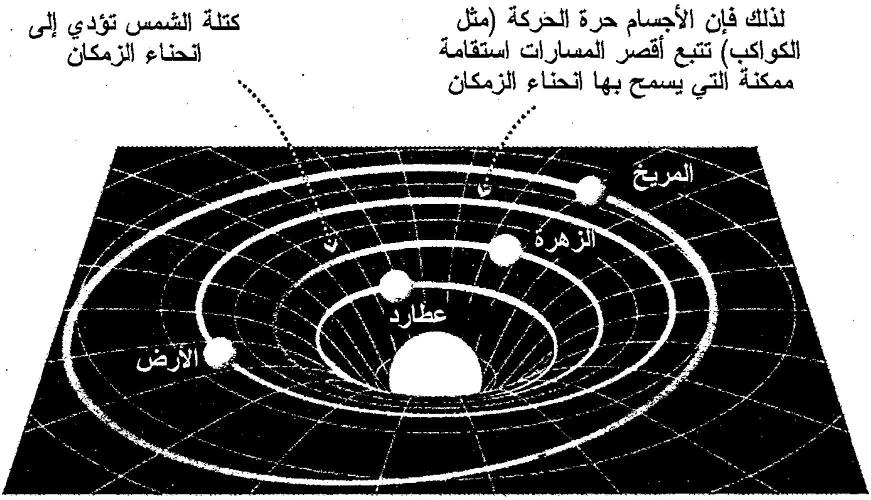
ويمكننا توسيع هذه الفكرة أكثر برسم خرائط مدارات عديدة. فعلى سبيل المثال، فإن الأجسام التي تدور على مقربة من الأرض تتبع مسار قطع ناقص أكثر ضيقًا من الأجسام التي تدور في مدارات أكثر ارتفاعًا، ويدلنا هذا على أن الفضاء يصبح أكثر انحناء كلما اقتربنا من الأرض. وبالمثل فإن الجسم الذي يدور حول كوكب كتلته أكبر مثل المشترى، يدور في مدار أسرع من جسم يماثله على نفس المسافة من الأرض. ويدلنا هذا على أن الفضاء يجب أن يكون أكثر انحناء (ليؤدي إلى الدوران بسرعة أعلى) حول المشتري منه حول الأرض. وتقودنا تلك الأفكار إلى استنتاج جوهري: **يتشكل انحناء الزمكان بالكتل داخله.** كلما زادت كتلة الجسم كلما زاد انحناء الزمكان حولها. والجسم الصغير الذي يدور حول جسم كتلته أكبر يتبع ببساطة أكثر المسارات استقامة ممكنة والمتاحة حسب البنية الموضعية للزمكان.

والطريقة الشائعة لتصور هذه الفكرة هي أن نمثل الزمكان عن طريق ملاءة مطاطية نضع عليها كتلا تمثل الأجسام مثل الكواكب والنجوم[1]. ويوضح شكل (٦-٣) نموذجًا لملاءة مطاطية للزمكان حول الشمس. ونمثل الشمس بكتلة ثقيلة موضوعة على الملاءة المطاطية. ونستطيع أن نتصور النجوم ككرات من الرخام تدور حول الانخفاض الذي سببته الكتلة الثقيلة للشمس. وبعبارة أخرى، فإن الكتلة المركزية تسبب انحناء الزمكان. ومثلما تدور كرات الرخام حول الكتلة الثقيلة لأنها تتبع أكثر المسارات استقامة ممكنة حسب مكانها على الملاءة المطاطية، فإن ذلك يشبه كثيرًا ما يحدث عندما تدور الكواكب حول الشمس، لأنها تتبع أكثر المسارات استقامة ممكنة في زمكانها الموضعي.

وكما هو الحال مع كل التشبيهات الزمكانية فإننا يجب أن نضع في اعتبارنا ألا نأخذ تشبيه الملاءة المطاطية كتشبيه مناسب تمامًا. فهو يقوم بوظيفة معقولة في تمثيل طريقة عمل المدارات، ولكن الهندسة التي تتعلق بملاءة مطاطية لا تتناسب بشكل كاف مع هندسة الزمكان؛ وفي الحقيقة فإن الملاءة المطاطية لا توضح لنا على الإطلاق البعد **الزماني** في الزمكان. والأكثر أهمية، أن نتذكر أن مثال الملاءة المطاطية مثالا ثنائي الأبعاد للحقيقة الرباعية الأبعاد، ونحن لا نرى أيًا من التحريفات التي تمثلها الملاءة المطاطية عندما نستطلع في الحقيقة الفضاء. فعندما ننظر من خلال تلسكوب إلى الشمس والكواكب فإنها تبدو ببساطة ككرات، وليست كرات موضوعة فوق ملاءات مطاطية أو أوعية فخارية.

---

(١) ومن الناحية الفنية، تمثل ما تسمى الرسوم البيانية الضمنية ***embedding diagrams*** مقطعًا ثنائي الأبعاد لجسم أو لمنطقة في الفضاء كما قد تبدو إذا كنا نستطيع رؤيتها في الفضاء المتعدد الأبعاد. ويوضح شكل (٦-٣)، على سبيل المثال ما يبدو لنا بوصفه مستوى مسطحًا يقطع الشمس عند خط استوائها ومدارات الكواكب (الموجودة تقريبًا في نفس المستوى)، ولكنه قد يبدو في الوجود المتعدد الأبعاد كسطح منحن له شكل يماثل الشكل الموضح تقريبًا.



شكل (٦-٣)

وفقًا للنسبية العامة، تدور الكواكب حول الشمس بالطريقة نفسها التي تلف بها كرات رخامية حول ملاءة مطاطية مشدودة: ويمضي كل كوكب في طريق مستقيم بقدر الإمكان، ولكن انحناء الزمكان يؤدي إلى انحناء المسار في الفضاء.

غدسية الجاذبية

ومع وجهة نظرنا الجديدة حول الجاذبية فنحن على استعداد للنظر في النتائج القابلة للاختبار في نظرية أينشتاين. وسنبدأ بالبحث في النتائج الملاحظة فيما يتعلق بانحناء الزمكان حول الأجسام التي لها كتلة هائلة.

لا نستطيع أن نرى مباشرة انحناء الزمكان، ولكننا نستطيع سبره بملاحظة مسارات أشعة الضوء. ينتقل الضوء بالسرعة نفسها مما يعني أنه لا يتسارع أو يتباطأ أبدًا، ولذلك فإن الضوء يجب أن يتبع أكثر المسارات استقامة ممكنة خلال

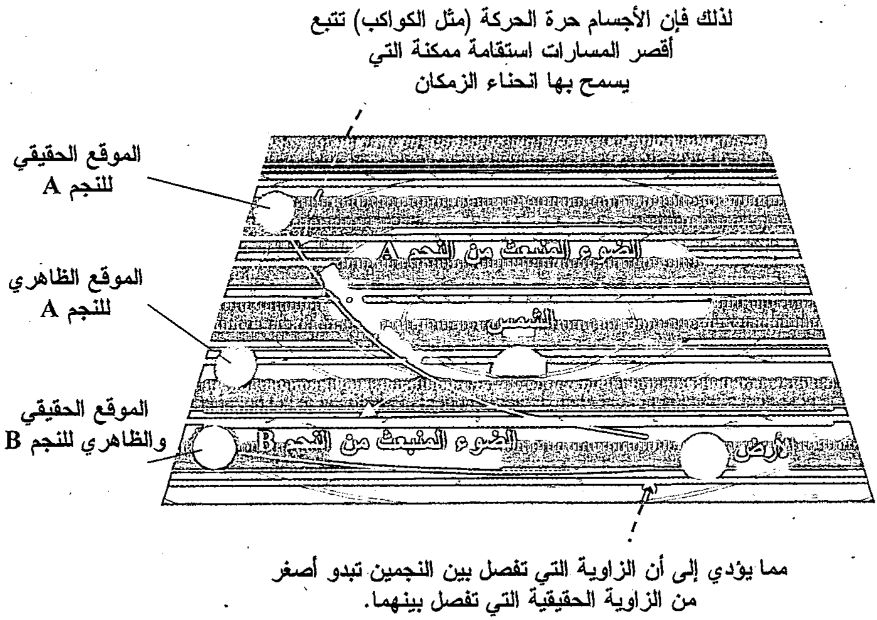
الفضاء والزمكان. ولقد أدرك أينشتاين هذه الحقيقة، وساعدته على أن يقوم بواحدة من أهم التوقعات في تاريخ العلم: فلقد توقع أن النجوم ينبغي أن تبدو منحرفة قليلا عن موضعها عندما يتم مشاهدتها قرب الشمس أثناء كسوفها الكلي.

ويستطيع علماء الفلك أن يقيسوا بدقة تمامًا مواضع النجوم والزوايا التي تفصل بينها في السماء ليلاً، ولكنه لنفترض أننا ننظر إلى نجمين في أثناء النهار – ودعونا نطلق عليهما النجم *A* والنجم *B* – ويظهر النجم *A* في السماء أقرب إلى الشمس. وكما هو موضح في شكل (٦–٤)، فإن حقيقة أن الفضاء أكثر انحناء بالقرب من الشمس ينبغي أن تؤدي إلى أن ضوء النجم *A* يجب أن يتبع مسارًا أكثر انحناءِ من ضوء النجم *B*، مما يؤدي إلى نتيجة في القياس هي أن الزاوية التي تفصل بين النجمين يجب أن تبدو أصغر من تلك التي نراها في المساء[١].

وانطلق فريقان من الفلكيين مستخدمين توقعات أينشتاين لملاحظة مواقع النجوم أثناء الكسوف الكلي في ٢٩ مايو ١٩١٩. في بعثة قادها آرثر إيدينجتون شاهدت الكسوف من جزيرة برينسيب في خليج غينيا على الساحل الغربي لأفريقيا، بينما قاد أندرو كروملين بعثة أخرى ليشاهد الكسوف في شمال البرازيل. وأعلنت النتائج في ٦ نوفمبر من نفس العام، التي أدت إلى نجاح باهر لتوقعات أينشتاين. وأدت حقيقة أن العلماء قد أكدوا بالملاحظة انحناء الزمكان إلى اهتمام شديد من وسائل الإعلام وأصبح أينشتاين الذي كان معروفًا بالكاد خارج المجتمع العلمي، اسمًا معروفًا على كل لسان.

---

(١) من المثير، أن نظرية نيوتن قد توقعت أيضًا انحناء ضوء النجم قرب الشمس (ويعود ذلك أساسًا إلى أن الضوء يعامل نفس معاملة جسيمات لها كتلة تنتقل بسرعة الضوء)، وكان العلماء في ذلك الوقت يدركون جيدًا ذلك التوقع، ومع ذلك، فقد وجد أينشتاين أن النسبية العامة قد توقعت بأن الانحناء هو ضعف الانحناء الذي توقعته نظرية نيوتن، مما يناسب إمكانية اختبار أي من النظريتين تتوافق مع الملاحظات.



شكل (٦-٤)

إذا لاحظنا نجمين في ضوء النهار، ويمكننا ذلك أثناء كسوف الشمس، فإن انحناء الفضاء قرب الشمس قد يؤدي إلى تغيير في قياس مواقع النجمين.

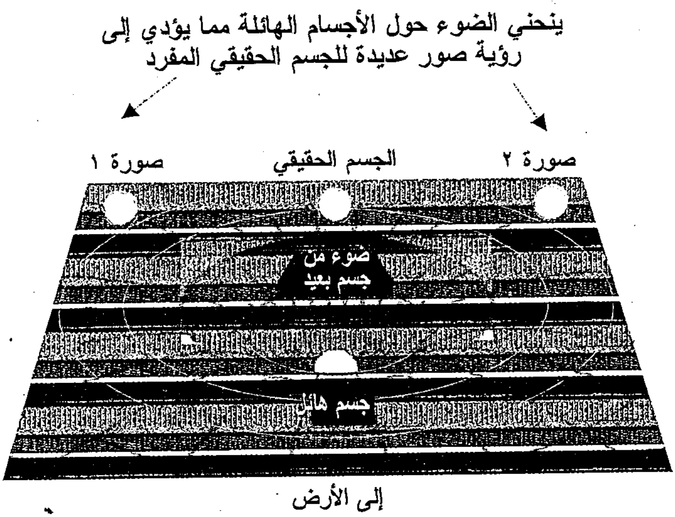
ويسمى عادة انحناء الضوء بتأثير الجاذبية، **بعدسية الجاذبية** ***gravitational lensing***، لكونه يشبه الطريقة التي تؤدي بها العدسات الزجاجية إلى انحناء الضوء، والتي قد تم التأكيد على صحتها في العديد من المرات منذ ذلك الحين. وقد استمر الفلكيون في ملاحظة النجوم أثناء المرات اللاحقة لكسوف الشمس. وفي الستينيات، ساعد اختراع التلسكوب اللاسلكي الفلكيين على قياس مواقع النجوم حتى في غياب الكسوف، حيث أن ضوء الشمس لا يتداخل مع قياسات الراديو بالطريقة نفسها التي يتداخل بها مع الضوء المرئي. واليوم، فإن انكسار ضوء نجم بسبب الشمس يمكن أن يتم قياسه بدقة كبيرة وبما يتوافق وتوقعات أينشتاين إلى درجة أقل

من ١ على ١٠٠٠٠ جزء. وبعبارة أخرى، فمع دقة التكنولوجيا الحالية، فإن توقعات النسبية العامة تتطابق تمامًا مع المشاهدات التي تتم ملاحظتها عن انكسار ضوء النجم. وبعثة **جايا** ***Gaia*** التي قرر الاتحاد الأوربي للفضاء إرسالها بعد وقت قصير من إرسال هذا الكتاب إلى المطبعة، ستكون قادرة على اختبار هذا التوافق بدقة أكثر صرامة، هي نحو ٢ جزء في المليون).

وعند النظر إلى ما وراء مجموعتنا الشمسية، فإن عدسية الجاذبية بمقدورها أيضًا أن تسبب انحراف الضوء المنبعث من أجسام بعيدة، بطريقة مذهلة غالبًا. ويوضح شكل (٦–٥) الطريقة التي يسير بها الأمر. فعندما يقع نجم بعيد أو مجرة وراء جسم هائل آخر (عندما نراه من الأرض)، فإن الجسم المتداخل يسبب انحناء الزمكان في محيطه، ولذلك فإن مسارات أشعة الضوء التي قد تنبعث في اتجاهات مختلفة من الممكن أن تجتمع في نهاية المطاف على سطح الأرض. ووفقًا لهندسة المكان الرباعية الأبعاد الموجودة بالضبط بيننا وبين النجم المُشاهَد أو المجرة، فإننا عندما نرى الصورة فإنها قد تكون مكبرة أو مشوهة إلى أقواس وحلقات أو صور مختلفة لنفس الجسم. ويوضح شكل (٦–٦) هذا التأثير في صورة مدهشة التقطها تلسكوب هابل الفضائي.

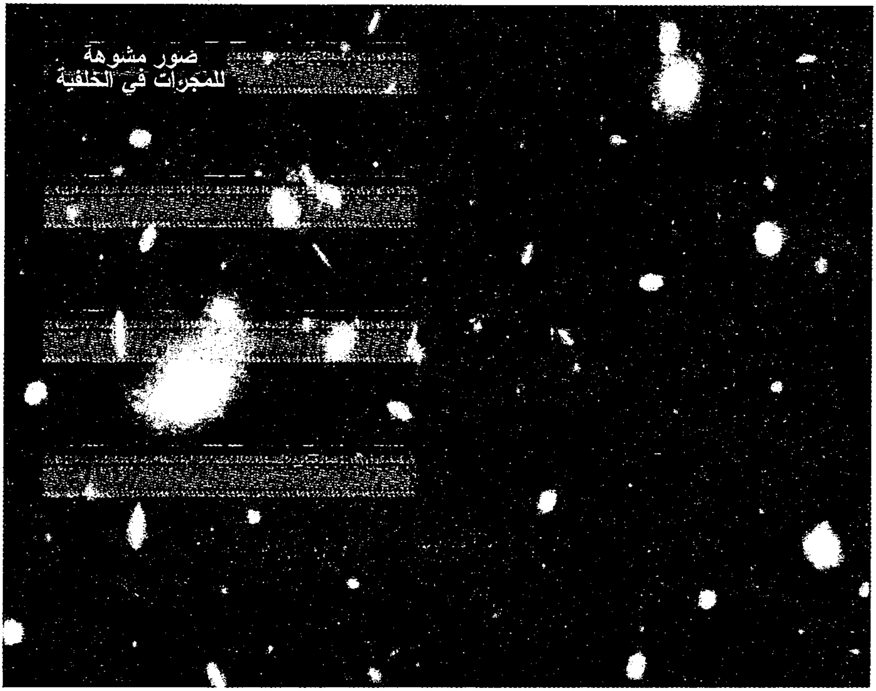
ومن الجدير بالذكر، أن عدسية الجاذبية لا تقوم فقط بعمل صور جميلة ولكن لها فائدة أيضًا. وقد اكتشف الفلكيون حالات عديدة جدًا من عدسية الجاذبية في الفضاء البعيد، والتي يقومون باستخدامها روتينيًا "بالمعكوس" لعمل خرائط عن **المادة المظلمة** ***dark matter*** في الكون. وربما تكون قد سمعت بأن هناك أدلة مؤكدة تدل على أن معظم المادة الموجودة في الكون لا ينبعث منها أي ضوء على الإطلاق (ومن هنا جاءت تسميتها بالمادة **المظلمة**)، مما يعني أنها غير مرئية على الإطلاق بواسطة تلسكوباتنا. ومهما يكن الأمر فإن الفلكيين يستطيعون حساب التشوهات الحاصلة للضوء التي تسببها عدسية الجاذبية لقياس توزيع الكتلة التي

تؤدي بالضرورة إليها. حيث إن الكتلة لها نفس التأثير سواء أكانت مادة عادية أم مظلمة، فإن هذه القياسات يمكن استخدامها في تحديد مكان المادة المظلمة والمقدار الموجود منها. وهناك ملاحظة جانبية شيقة حول توقعات أينشتاين الناجحة فيما يتعلق بعدسية الجاذبية جاءت على لسانه حول نتائج الاختبارات. وعلينا أن نلاحظ أن أينشتاين قد بحث عن النظريات التي بها حسب رأيه، قدر من الجمال والتناسق والتي تؤكد على أن قوانين الطبيعة هي نفسها بالنسبة لكل الأطر المرجعية. وكان واثقًا أن الجاذبية العامة تقدم وجهة نظر أكثر جمالا ومعقولية للكون مما قدمته النظرية القديمة التي حلت الجاذبية العامة محلها.



شكل (٦-٥)

يوضح هذا المخطط الكيفية التي يمكن أن تتسبب بها عدسية الجاذبية في رؤية صورتين منفصلتين لجسم حقيقي واحد. لاحظ أنك إذا نظرت إلى نفس الفكرة من منظور ثلاثي الأبعاد (بدلا من بعدين كما هو موضح هنا)، فإنك ستحصل على صور عديدة أو حتى أقواس وحلقات. وإذا كان الفاصل بين الصور صغيرًا، فإن النتيجة ستكون صورة واحدة مكبرة.



شكل (٦-٦)

توضح صورة تلسكوب هابل الفضائي كتلة من المجرات معروفة باسم أبيل ٢٢١٨. وقد تسببت عدسية الجاذبية في الأقواس الرفيعة، حيث إن جاذبية الكتلة قد شوهت الضوء المنبعث من المجرات التي تقع خلفها. ناسا/ تلسكوب هابل الفضائي العلمي.

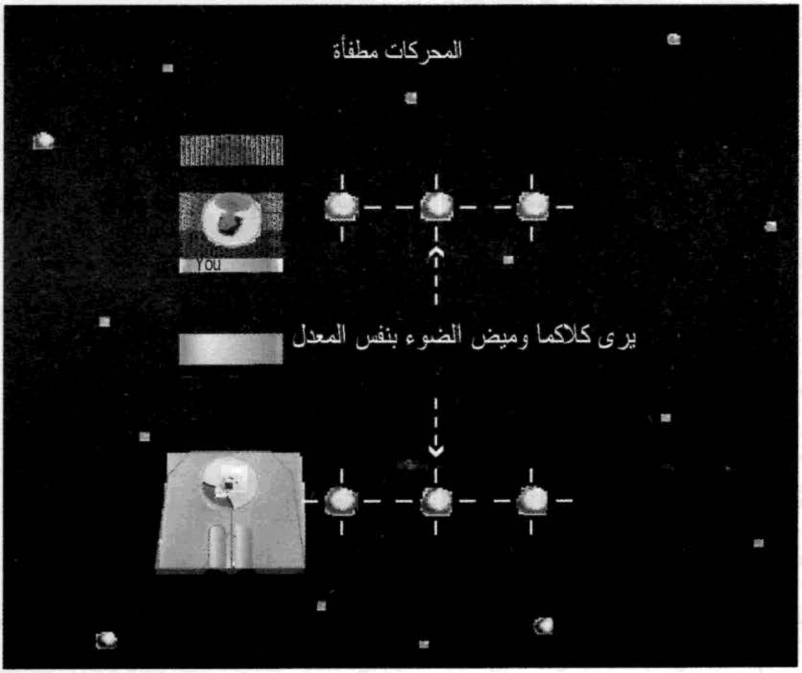
ولذلك عندما سأله أحد الطلاب في عام ١٩١٩ عما سيكون عليه رد الفعل إذا لم تؤكد مشاهدات الكسوف توقعاته النظرية، فقد قيل إنه أجاب: "عندئذ فإنني سأشعر بالأسف تجاه الرب الطيب. فالنظرية صحيحة في كل الأحوال". وليست هذه المقولة هي أكثر المقولات علمية التي ذكرها، حيث إن الملاحظات والتجارب هي الحكم النهائي في العلم، ولكن هذا يوضح الأهمية التي وضعها أينشتاين عن تصور الكون بوصفه معقولا.

التمدد في الزمن والانزياح نحو اللون الأحمر بسبب الجاذبية

تذكر أنك أثناء رحلتك إلى الثقب الأسود في فصل ١، أرسلت ساعة لتسقط باتجاه الثقب الأسود ولاحظت أن الزمن يسير ببطء، وأن أرقامها تزداد احمرارًا خلال سقوطها. وترجع كلتا المشاهدتين إلى التوقع المذهل الذي قامت به النسبية العامة حول الجاذبية والزمن. وكما هو معتاد، فإننا سنستخدم تجربة ذهنية لنفهم هذا التوقع.

تصور أنك وآل بدلا من كونكما في سفينتين فضائيتين منفصلتين، أصبحتما في نفس السفينة الفضائية، واحدة من السفن الطويلة التي تشبه الصاروخ، وكل واحد منكما في أحد أطرافها (شكل ٦-٧). السفينة في الفضاء ومحركاتها مطفأة، ولذلك فإنك وآل تطفوان في حالة انعدام وزن، وكل منكما لديه ضوء يومض مرة واحدة كل ثانية. ولأنكما تطفوان بحرية وليست هناك حركة نسبية بينكما فإنكما ستكونان في الإطار المرجعي نفسه. ولذلك، فإن كل منكما سيرى الضوء المنبعث بنفس المعدل.

والآن، ضع في اعتبارك ما يحدث عندما تدير محركات السفينة الفضائية. ولأنكما في السفينة فإنك وآل ستشعران بوزنكما يشدكما إلى الأرضية، آل في المقصورة السفلى (في خلفية السفينة) وأنت في المقصورة العليا (في مقدمة السفينة). وبمقدورك تفسير هذا الشعور بالوزن على أنه يعود إما إلى التسارع أو إلى الجاذبية. ولكن دعنا نفترض أنك ستعزيه إلى التسارع، ربما لأنك تلاحظ أن سرعتك تزداد بالنسبة إلى كوكب ما قريب منك. ما الذي سيؤدي إليه التسارع بالنسبة إلى الطريقة التي سيرى بها كل منكما وميض الضوء المنبعث من عند الآخر؟



شكل (٦-٧)

تطفو أنت وآل في حالة انعدام وزن في سفينة فضاء صاروخية الشكل. كل منكما لديه ضوء يومض مرة واحدة كل ثانية. ولأنكما تتشاركان نفس الإطار المرجعي، فإن كل منكما سيرى الضوء يومض بنفس المعدل. ناسا/ تلسكوب هابل الفضائي العلمي.

سنجيب عن هذا السؤال بالتفكير في حقيقتين: (١) يستغرق الوميض وقتًا قصيرًا لينتقل من أحد طرفي السفينة الفضائية إلى الآخر، و(٢) أثناء هذا الوقت القصير، يعني التسارع أن سرعة السفينة الفضائية تتزايد. دعنا نبدأ بوجهة نظرك. ولأنك في مقدمة سفينة فضائية متسارعة، سيؤدي تزايد سرعتها إلى استنتاج أنك **تبتعد** عن النقطة التي ينبعث منها الوميض من عند آل. ولذلك فإن وميض آل

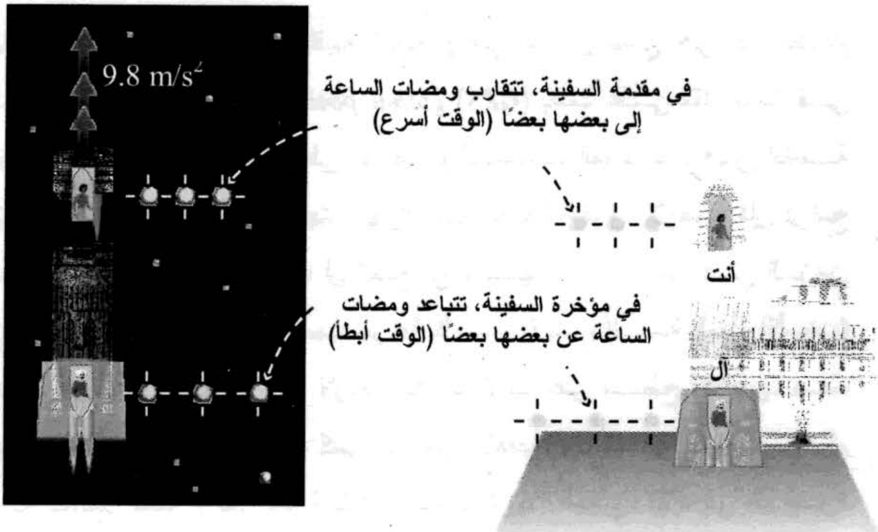
ينبغي أن ينتقل مسافة أطول ليصل إليك عما كان عليه الحال من قبل. وحيث إن السفينة تستمر في تسارعها بالمعدل نفسه، فإن هذا الوقت "الزائد" سيكون هو نفسه دائمًا، مما يعني أنك سترى الوميض الذي يبعث من عند آل منتظمًا في معدله – ولكنه سيومض الآن بصورة **أبطأ** من معدل وميض واحد كل ثانية. ولأنك تعلم أن المصباحين مصممان بحيث ينبعث وميض واحد من أي منهما كل ثانية (ومصباحك ما زال يسير كذلك)، فإنك ستستنتج **أن وقت آل في مؤخرة السفينة الفضائية ينبغي أن يكون سيره أبطأ من وقتك.**

نتحول إلى وجهة نظر آل في مؤخرة السفينة الفضائية، ازدياد سرعة السفينة الفضائية يعني أنه **يقترب** من النقطة التي ينبعث منها وميضك. ووجهة نظره لذلك ستكون عكس وجهة نظرك. فسيرى الومضات المتتابعة من مصباحك تستغرق وقتًا أقل لتصل إليه عن الوقت الذي كانت تستغرقه من قبل، مما يعني أنه سيرى ومضاتك تأتي إليه بمعدل أسرع من ومضة واحدة في الثانية وسوف يستنتج أن الزمن عندك يمر **أسرع** من زمنه. وبعبارة أخرى، فإنك وآل ستتفقان على أن ومضات المصباح ستكون أسرع في مقدمة السفينة الفضائية المتسارعة عنها في مؤخرتها، مما يعني أنكما تتفقان على أن الزمن يمضي أسرع في المقدمة وأبطأ في المؤخرة.

دعونا نتوقف لحظة لنقارن هذا الموقف بالموقف الذي بحثناه في فصل ٥، الذي كنتما أنت وآل تطفوان فيه في حالة انعدام وزن عندما كنتما تتحركان بالنسبة لبعضكما البعض بسرعة عالية. في تلك الحالة، كان بمقدورك أن تجادل بلا توقف حول زمن من منكما الذي يسير "في الحقيقة" بطيئًا، وحيث إن حركتك كانت مستمرة فلم تكن هناك طريقة لمقارنة ساعتيكما معًا لترى من منهما التي تتحرك بصورة أبطأ. وفي حالتنا الراهنة، فإنكما تتشاركان نفس السفينة الفضائية، مما

يعني أنكما تستطيعان بسهولة أن تقارنا ساعتيكما بصعود أحدكما أو هبوط الآخر درجات السلم. وبناء عليه، تعني حقيقة أن الزمكان هو نفسه بالنسبة للجميع، أنكما ستتفقان على ما ستريانه عند مقارنة الساعات، ولن يكون هناك شك في أن الساعة التي كانت في مؤخرة السفينة قد حسبت قدرًا من الوقت أقل من الساعة المشابهة الموجودة في المقدمة.

لقد اكتشفنا الآن أن الوقت يمر أبطأ في مؤخرة السفينة الفضائية المتسارعة، ونستطيع ببساطة أن نطبق مبدأ التكافؤ، الذي يقول بأننا سنجد نفس النتائج بالنسبة لأية سفينة في حالة سكون في حقل للجاذبية (شكل ٦-٨). واستنتاجنا المذهل: بالنسبة لأية سفينة فضائية أو مبنى أو أي جسم آخر على الأرض، تتنبأ النسبية العامة بأن **الزمن يمر بصورة أكثر بطئًا في المناطق السفلى عنه في المناطق العليا**. أي أن الزمن يجب أن يمر بصورة أكثر بطئًا في المنخفضات عنه في المرتفعات في أي حقل للجاذبية. ويعرف هذا التأثير باسم **التمدد الزمني للجاذبية**. وكلما زادت قوة الجاذبية وزاد انحناء الزمكان، كلما ازداد تمدد الزمن بفعل الجاذبية.



شكل (٨-٦)

(يسارًا) إذا أدرت محركات السفينة الفضائية حتى تتسارع، فإنك ستبتعد عمليًا، عن ومضات آل بينما هو يتحرك في اتجاهك، مما يعني أنكما ستتفقان على أن ومضاته تحدث بصورة أبطأ من ومضاتك. (يمينًا) وفقًا لمبدأ التكافؤ، فإنك ستجد النتيجة نفسها بالنسبة لسفينة فضاء على الأرض، مما يعني أن الوقت يمضي بصورة أبطأ في الأماكن المنخفضات (حيث تكون الجاذبية أقوى) عنه في الأماكن المرتفعة.

إن التنبؤ بتمدد الزمن بسبب الجاذبية يمكن اختباره بمقارنة الساعات الموضوعة في أماكن لها حقول جاذبية مختلفة في قوتها. وعلى الأرض، فإن الساعات الذرية الدقيقة يتم استخدامها لقياس الاختلافات في معدل مرور الوقت في الارتفاعات المختلفة في حدود صغيرة قد لا تتعدى مترًا واحدًا. وعلى الرغم من الاختلافات في الزمن التي تحدث على ارتفاعات مختلفة على الأرض صغيرة جدًا، بحيث لا تتعدى إضافة بضعة أجزاء من البليون من الثانية إلى وقت حياة الإنسان،

فإنها تتوافق تمامًا مع تنبؤات الجاذبية العامة. وعلى مستوى عملي أكثر، فإن نظام التوجيه العالمي ***global positioning system*** (***GPS***) يعتمد على مقارنات في القياس دقيقة جدًا بين الساعات على الأرض والساعات الموجودة في أنظمة الستالايت المدارية. ولأن الستالايت تتحرك بسرعة عالية فوق الأرض، فإن برامج التشغيل التي تستخدم النظام يجب أن تضع في حسبانها كلا من التمدد في الزمن الذي تتنبأ به النسبية الخاصة (حسب سرعة كل ستالايت بالنسبة إلى الأرض) وتمدد الزمن بتأثير الجاذبية وفقًا لارتفاع كل ستالايت على سطح الأرض. هذه "التصحيحات" للنسبية على جانب كبير جدًا من الأهمية؛ ودونها فإن مواقع نظام التوجيه العالمي ستكون غير دقيقة بشكل ملحوظ. وبهذا المعنى، فإنك في كل مرة تستخدم فيها نظام التوجيه، فإنك تختبر وتتأكد من التنبؤات المحورية لكل من نظريتي أينشتاين للنسبية الخاصة والعامة.

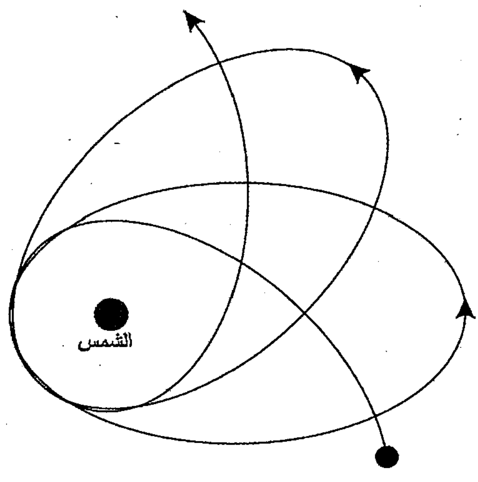
ومع الأخذ في الاعتبار أن الأرض لها مجال جاذبية ضعيف، فإنك تتساءل عما إذا كنا قد اختبرنا أبدًا التنبؤات الخاصة بزيادة تمدد الزمن بفعل جاذبية الأجسام التي لها جاذبية قوية. والإجابة هي نعم، لأنه على الرغم من أننا لم نضع أية ساعات على أي من هذه الأجسام، فإن كل الأجسام الفلكية تقريبًا لها ساعات ذرية طبيعية. ونحن نستطيع مراقبة الساعات الطبيعية بتوزيع الضوء في أطياف شبيهة بأطياف قوس قزح. وعند درجة عالية بما فيه الكفاية من الدقة سنجد أن أطياف الشمس والنجوم الأخرى تحتوي على العديد من **الخطوط الطيفية** ***spectral lines*** الحادة. وكل هذه الخطوط لها خواص ترددية، تجعله بمثابة ساعة ذرية.

وحتى نتبين الطريقة التي تساعدنا بها الخطوط الطيفية على اختبار النسبية العامة، فلنفترض أن غازًا من نوع ما يبعث خطًا طيفيًا، عندما قمنا بإنتاج مثيله في معمل على الأرض، وجدنا أن له تردد ٥٠٠ تريليون دورة في الثانية. إذا كان نفس الغاز موجودًا في الشمس، فإنه سيبعث أيضًا خطًا طيفيًا تردده ٥٠٠ تريليون

دورة في الثانية. ولكن بما أن للشمس جاذبية أقوى من الأرض، فإن النسبية العامة تتنبأ بأن الزمن ينبغي أن يمضي ببطء أكثر على الشمس، مما يعني أن الثانية الواحدة على الشمس ستكون أطول من الثانية الواحدة على الأرض. ولذلك، فإننا أثناء ثانية واحدة على الأرض لن نرى كل الـ ٥٠٠ تريليون دورة للغاز الموجود على الشمس، أي أن الخط الطيفي سيبدو أقل ترددًا عندما نلاحظ المجال الطيفي للشمس عما سيكون عليه الحال إذا قمنا بإنتاجه في معمل على الأرض. ولأن التردد الأقل يعني مزيدًا من احمرار اللون، فإن التباطؤ في الزمن سيجعل الخط الطيفي يبدو أكثر احمرارًا مما سيكون عليه. ويسمى هذا التأثير الانزياح نحو اللون الأحمر، وهو يفسر الاحمرار الذي حدث في أرقام الساعة الذي لاحظناه عندما قمت بإسقاط ساعتك في اتجاه الثقب الأسود في فصل ١. وما هو أكثر أهمية، ولأننا نعلم إلى أية درجة تكون الجاذبية قوية على الشمس والنجوم الأخرى، فإن النسبية العامة تتيح لنا بأن نتنبأ بدقة بمقدار الانزياح إلى اللون الأحمر بفعل الجاذبية الذي سنلاحظه. وهكذا كما توقعنا، فإن نتائج المشاهدات تتوافق مع تنبؤات النسبية العامة.

وقد تم اختبار النسبية العامة بالعديد من الاختبارات بطرق عديدة، وقد اجتازت إلى أبعد حد كل إختبار قد أجري عليها. وسأذكر هنا مجرد اختبار واحد مباشر، له أهمية خاصة من الناحية التاريخية. لقد تنبأ قانون جاذبية نيوتن بأن مدار كوكب عطارد يجب أن يلتف ببطء حول الشمس بسبب تأثير جاذبية الكواكب الأخرى؛ ويوضح شكل (٦-٩) منظرًا متضخمًا جدًا للكيفية التي يبدو عليها هذا الالتفاف. وقد أوضحت المشاهدات الدقيقة لمدار عطارد أثناء القرن التاسع عشر أنه في الحقيقة يلتف، ولكن الحسابات التي أجريت بواسطة قانون نيوتن للجاذبية لم تكن متوافقة تمامًا مع المشاهدات. وقد كان التناقض ضئيلا (كان المعدل المتوقع مختلفًا بمقدار ٠,٠١ درجة كل مائة سنة تقريبًا)، ولكن الفلكيين لم يستطيعوا اكتشاف طريقة لحسابه. وقد كان أينشتاين واعيًا بهذا التناقض، ومنذ الوقت الذي

فكر فيه لأول مرة في مبدأ التكافؤ، فإنه تمنى أن هذه الفكــرة الجديــدة قــد تمــدنا بطريقة لتفسير مدار عطارد. وعندما نجح أخيرًا، كان منفعلا جدًا لدرجة أنـــه لــم يكن قادرًا على العمل في الأيام الثلاثة التالية، وقد سمى لحظة نجاحه هــذه لاحقًــا باسم أعظم نقطة في حياته العلمية. وفي جوهر الأمر، أوضح أينشتاين أن التناقض قد انبثق لأن قانون جاذبية نيوتن يفترض أن الزمان مطلق والفضاء مسطح. وفــي الحقيقة، فإن الزمن يمر بصورة أكثر بطئًا، والفضاء يكون أكثر انحناء على ذلــك الجزء من مدار عطارد القريب من الشمس. وقد وضعت معادلات الجاذبية العامـــة هذا الانحراف للزمكان في اعتبارها، وقدمت تنبؤًا لمدار عطارد يتوافق بدقـــة مـــع المدار الذي تم رصده.



شكل (٦-٩)

يوضح هذا التخطيط الطريقة التي يلف بها كوكب عطارد حول نفسه وحول الشمس. والصورة متضخمة بشكل كبير، فالمعدل الحقيقي للانحراف في الدوران هو أقل من درجتين كل مائة سنة. وتستطيع نظرية نيوتن للجاذبية حساب معظم وليس كل الانحراف في الدوران، الذي تفسره النسبية العامة تمامًا.

عودة مفارقة التوأمين

إن أفكار النسبية العامة يمكن استخدامها للوصول إلى استبصار جديد حول ما يسمى مفارقة التوأمتين، الذي قمنا بمناقشته بشكل مختصر في فصل ٤. تذكر أن هذا التناقض انبثق عندما نظرنا في حالة توأمتين إحداهما ظلت في منزلها على الأرض بينما ذهبت الأخرى في رحلة إلى نجم بعيد بسرعة عالية ثم عادت. ولأن كل الحركات نسبية، فإن التوأم التي زارت النجم البعيد حرة في أن تدعي أنها لم تذهب إلى أية مكان، وأن الأرض والنجم البعيد هما اللذان تحركا، فأولا أتى إليها النجم البعيد وتحركت الأرض بعيدًا، ثم انعكس الاتجاه وعادت الأرض ثانية إليها بينما ابتعد النجم. وتحيط تلك المفارقة بسؤال حول من سيكون أقل عمرًا أثناء الرحلة، حيث إن كل توأم بمقدورها أن تدعي بأن الأخرى هي التي سافرت.

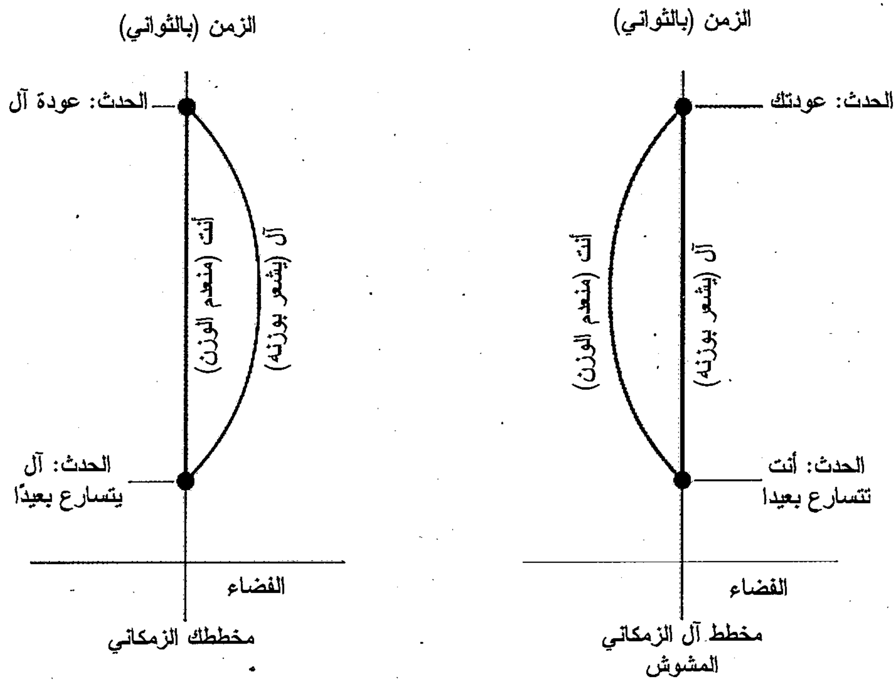
ولاحظنا في فصل ٤، أن حل هذا التناقض قد حدث لأن التوأمتين ليس لهما موقف متماثل: فإحداهما قد جربت تسارعات لم تجربها الأخرى واكتشفنا أن التوأم التي سافرت سيكون عمرها أقل.

ومع النسبية العامة نستطيع أن نستخدم تجربة ذهنية للنظر بطريقة أعمق في حل هذا التناقض. افترض أنك وآل تطفوان في حالة انعدام وزن بالقرب من بعضكما البعض ولديكما ساعات متزامنة. وبينما بقيت أنت في حالة انعدام وزن، فإن آل أدار محركاته ليتسارع مسافة قصيرة مبتعدًا عنك، وتباطأ حتى وقف قليلا في مكانه البعيد ثم استدار وعاد. من وجهة نظرك، فإن حركة آل تعني أن ساعته ستدق بصورة أكثر بطئًا من ساعتك. ولذلك، ستتوقع عند عودته أن تجد أن وقتًا أقل من وقتك قد مر على آل. والآن دعونا ننظر إلى الطريقة التي سينظر بها آل إلى الموقف.

بمقدور كليكما التنازع بلا توقف حول من منكما الذي يتحرك، ولكن هناك حقيقة واحدة واضحة هي: أثناء الرحلة، بقيت أنت في حالة انعدام وزن بينما شعر

آل بوزنه يشده إلى أرضية السفينة الفضائية. ويستطيع آل أن يفسر وزنه بطريقتين: أولاً، يمكن أن يتفق معك أنه تسارع وفي تلك الحالة فإنه سيتفق معك في أن ساعته تسير أبطأ من ساعتك لأن الزمن يكون أكثر بطئًا في السفينة الفضائية المتسارعة، أو بدلا من ذلك، يمكنه أن يدعي أنه شعر بوزنه لأن إدارة محركاته قد قاومت حقلا مغناطيسيًا، وأنه في حالة سكون بينما أنت من يطفو حرًا. لاحظ، أنه مع ذلك، ما زال يتفق معك على أن ساعته أكثر بطئًا من ساعتك، لأن الزمن يمر بطيئًا أيضًا في الحقول المغناطيسية. وبصرف النظر عن رؤية أي منكما إلى الأمر، فإن النتيجة واحدة: يمر بآل وقت أقل.

ويوضح الجانب الأيسر من شكل (٦-١٠) مخططًا زمكانيًا لهذه التجربة. تحركت أنت وآل بين نفس الحدثين في الزمكان (نقطتي البداية والنهاية لرحلة آل). ومع ذلك، فإن مسارك بين الحدثين أقصر من مسار آل. ولأننا قد استنتجنا للتو أن وقتًا أقل مر بآل، فإن هذا سيقودنا إلى استبصار مهم حول مرور الزمن: **بين أي حدثين في الزمكان يمر وقت أطول على المسار الأقصر (والأكثر استقامة بالضرورة)**. ويجري أقصى مقدار من الزمن تستطيع أن تسجله بين حدثين في الزمكان إذا اتبعت أقصر المسارات استقامة ممكنة، أي المسار الذي ستكون فيه في حالة انعدام وزن.

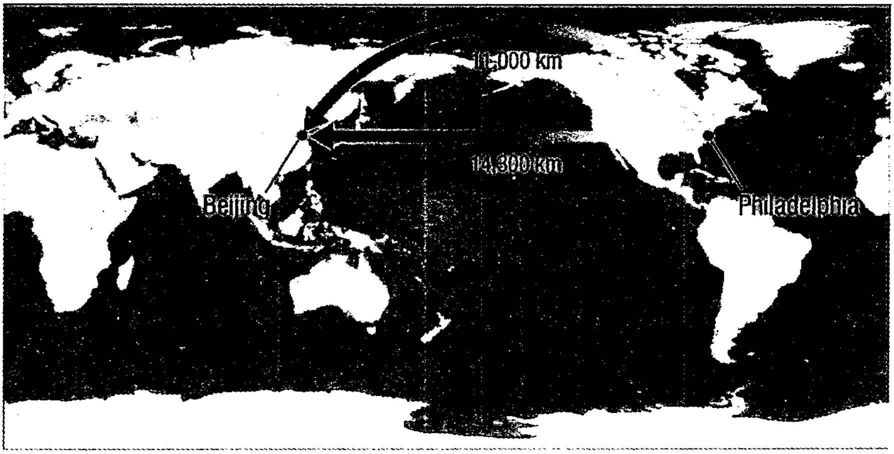


شكل (٦–١٠)

أنت، وآل قد تحركان بعيدًا ثم تعودان معًا، وأنت تطفو منعدم الوزن كل الوقت بينما آل يشعر بوزنه. ولأنك في حالة انعدام وزن فإنك تستطيع أن ترسم مخططك الزمكاني كما هو موضح على اليسار، مستنتجًا أن وقتًا أطول قد مر بك لأنك تتبع أقصر المسارات وأكثرها استقامة. ويفسر آل شعوره بوزنه باعتباره يعود إلى الجاذبية، مما يعني أنه قد يقوم برسم مخططه الزمكاني على قطعة مقوسة من الورق. ولذلك، إذا ما عرضناه مستويًا كما هو مبين على اليمين فإنه ينبغي أن يكون ملتويًا؛ إذا أعدنا رؤيته وهو في حالة صحيحة من الانحناء، ومخطط آل سيوضح أيضًا أنك تتبع أقصر المسارات وأكثرها استقامة.

ومفارقة التوأمتين ليست أكثر من سؤال عن لماذا لا يستطيع آل أن يدعي أنه الشخص الذي يتبع أقصر المسارات وأكثرها استقامة. وقد مال آل بالتأكيد إلى أن يرسم مخططه الزمكاني على اليمين في شكل (٦-١٠) الذي رسم فيه خط عالمه مستقيمًا خلال الزمن لأنه اعتبر نفسه في حالة سكون. ويجعله مخططه يبدو وكأن لديه أقصر المسارات وأكثرها استقامة، ولكن هذا المظهر هو في الحقيقة تشويش للواقع. ولنتذكر أن الوسيلة الوحيدة التي يستطيع بها الادعاء بأنه في حالة سكون هي بتأكيده على أن شعوره بوزنه يعود إلى الجاذبية، وفي تلك الحالة فإن الجاذبية ينبغي أن تسبب انحناء الزمكان بالقرب منه. ولذلك، إذا أراد أن يرسم مخططه الزمكاني الذي يوضح "أنه في حالة سكون" فإنه يجب أن يفعل ذلك على قطعة مناسبة من الورق المقوس – قطعة ستوضح أن مساره الحقيقي أطول وأكثر انحناء من مسارك.

ومسألة آل مشابهة لتلك التي تخص الطيار الذي يخطط لرحلة من فيلاديلفيا إلى بكين ومعه خريطة مستوية للأرض. وعلى الخريطة المستوية، فإن أكثر الطرق استقامة ممكنة ستبدو وأنها تمر عبر خط العرض الذي يربط المدينتين، كما هو موضح بالخط المستقيم في شكل (٦-١١). ومع ذلك فإن هذه الخريطة مشوشة، لأن سطح الأرض هو في الحقيقة منحن. وأقصر الطرق وأكثرها استقامة سيكون كما رأيناه في شكل (٦-٢) طريق الدائرة الكبرى، على الرغم من أن هذا الخط يبدو أكثر انحناء وأطول على الخريطة المستوية. وكما هو الحال بالنسبة للتشويش الحادث في خريطة العالم، الذي لا تتغير معه المسافة الحقيقية بين المدينتين، فإن الطريقة التي نختارها لرسم المخطط الزمكاني لا تغير حقيقة الزمكان. وآل في الحقيقة هو الشخص الذي مر به وقت أقل، لأن مساره خلال الزمكان كان بالفعل أطول وأكثر انحناء.



شكل (٦-١١)

توضح الخريطة المستوية نفس المسارين اللذين رأيناهما بين بكين وفيلاديلفيا في شكل (٦-٢). والتشويش الذي تتضمنه الخريطة المستوية يجعل الكرة الأرضية المستديرة يبدو عليها المسار الحقيقي الأقصر والأكثر استقامة وكأنه يبدو كمسار أطول.

ولكي نكون متأكدين من أن هذه الأفكار واضحة، دعونا نعود إلى رحلتك إلى الثقب الأسود. فمن أجل أن تصل إلى سرعة – وتستدير وتعود إلى الأرض – فإنك اجتزت تسارعات هائلة. هذه التسارعات تعادل الجاذبية القوية للغاية، وأثناء فترات التسارع فإن النسبية العامة تقول بأن ساعاتك ينبغي أن تبين وقتًا أقل بكثير من الوقت الذي يمر على الأرض. ولذلك السبب فإنك قد عدت إلى الأرض وعمرك أقل من عمر الناس عليها. وتوجد بعض الأخبار الطيبة في هذا. تذكر أننا جهزنا رحلتك بحيث إن تسارعك كان لحظيًا تقريبًا. وهذا كانت له أفضلية في تسهيل حساب مقدار التمدد في الزمن (الذي سوف يحدث لك بواسطة النسبية الخاصة)، ولكن كان له عيب أن ذلك يعني أن قوى التسارع سوف تقتلك. ونستطيع

الآن أن نقدم لك رحلة أكثر أمانًا: بدلا من التسارع اللحظي، بمقدورك أن تتسارع تدريجيًا إلى نقطة في منتصف المسافة، ثم تتباطأ تدريجيًا حتى الثقب الأسود، ثم تقوم بالعكس أثناء رحلة العودة. ما دام أن **متوسط** سرعتك هو نفسه كما افترضنا من قبل، فإن الزمن الكلي لرحلتك سيظل معروفًا كما وجدناه سابقًا.

أمواج الجاذبية

ما زالت لدينا نقطة كبيرة غامضة تتعلق بالجاذبية العامة وهي كيفية تأثير الأحداث التي تحدث في مكان ما على الأجسام الموجودة في أماكن أخرى. وبشكل أكثر تحديدًا، فإننا نعلم أن الكتل تسبب انحناء للفضاء وللزمكان، وأن تلك الكتل هي دائمًا في حالة حركة، سواء من خلال مدارات أو انفجارات أو أية طريقة أخرى. وكما تؤثر الكتل التي تتحرك في دوائر على ملاءة مطاطية في الشكل المحدد للملاءة حتى من على مسافات بعيدة عن الكتل، فإن التغييرات في الانحناء الموضعي في مكان ما في الفضاء يجب أن تؤثر في النهاية على الانحناء في أماكن أخرى. ولكن كيف بالضبط ينتقل التغيير الذي يحدث في مكان ما إلى أماكن أخرى؟

عندما فحص أينشتاين هذا السؤال، وجد أن التغيرات التي تحدث في انحناء الفضاء في مكان ما تنتشر إلى غيره من الأماكن الأخرى مثل التموجات على سطح البحيرة. وعلى سبيل المثال فإن تأثير أي نجم ينفجر داخليًا أو خارجيًا ينبغي أن يكون بالأحرى مشابهًا لرمي صخرة في بحيرة، ونجماين هائلي الكتلة يدوران حول بعضهما ستتولد سريعًا بالقرب منهما تموجات من الانحناء في الفضاء تشبه تلك التي يسببها مجداف في الماء. وقد أطلق أينشتاين على هذه التموجات اسم **أمواج الجاذبية** *gravitational waves*.

وقد تم توقع أن تكون موجات الجاذبية مشابهة لموجات الضوء في أنه ليس لديها كتلة وينبغي أن تنتقل بسرعة الضوء. وبالطريقة نفسها تقريبًا التي تسبب بها موجات الضوء حركة الجسيمات المشحونة (مثل الإلكترونات) ذهابًا وعودة عند المرور بها، فإن الاضطرابات في الفضاء التي تحملها موجات الجاذبية ينبغي أن تسبب انضغاط وتمدد أي كتل تمر بها. وينبغي من ناحية المبدأ أن نكون قادرين على استشعار هذه الموجات بالنظر في هذا النوع من الضغط والتمدد، ولكن هناك مشكلة: هي أن موجات الجاذبية من المتوقع أنها تحمل طاقة أقل بكثير جدًا من طاقة موجات الضوء، مما يعني أننا نحتاج مقاييس دقيقة بصورة غير اعتيادية لاستشعار تأثيراتها على الأجسام على الأرض. وحتى عام ٢٠١٣، لم يقدر أحد على القيام باستشعار محدد لموجات الجاذبية، وذلك على الرغم من أن مجهودات عظيمة قد تم بذلها. وأشهرها ما يسمى المرصد الليزري لقياس تداخل موجات الجاذبية *(LIGO)* الذي يتكون حاليًا من مجسات كبيرة في ولاية لويزيانا وولاية واشنطن للبحث من جانب إلى آخر عن علامات تدل على موجات الجاذبية. وقد وضعت ناسا والوكالة الأوربية للفضاء خططًا أولية لإنشاء مرصد أكثر حساسية لموجات الجاذبية الموجودة في الفضاء يسمى مقياس التداخل الفضائي الليزري الهوائي *(LISA)*. ومع ذلك، وبسبب القيود المفروضة على الميزانية، فمن غير المرجح أن يعمل هذا المرصد قبل حلول عام ٢٠٢٥. وبالنظر إلى أن موجات الجاذبية هي أحد التوقعات المهمة للنظرية العامة للنسبية، فهل ينبغي لنا أن نبالي بعدم رصدها حتى الآن؟ لا يعتقد معظم العلماء هذا، لأنه على الرغم من أننا ينقصنا الكشف المباشر عن موجات الجاذبية، فإن لدينا دليلا قويًا غير مباشر على وجودها. ويأتي هذا الدليل من "النجوم الثنائية النابضة ***pulsar***" التي تشبه كثيرًا نظم النجوم الثنائية الأخرى (بمعنى أنهما نجمان يدوران حول بعضهما بعضًا) فيما عدا أن كلا من النجمين يكون نجمًا **نيوترونيًا** مضغوطًا للغاية.

وتكون النجوم النيوترونية كثيفة بصورة لا يمكن تصديقها، وهي قياسيًا أكبر في كتلتها من كتلة شمسنا وقطرها ٢٠ كيلومترًا تقريبًا. (بالمقارنة إلى قطر شمسنا الذي هو ١,٤ مليون كيلومتر تقريبًا).

ويتيح لها حجمها الصغير أن تدور حول بعضها بعضًا بقرب وسرعة أكثر من النجوم العادية، وتتنبأ النسبية العامة بأن مثل تلك النظم ينبغي أن تبعث كميات كبيرة من الطاقة في صورة موجات جاذبية. ويعني انبعاث موجات الجاذبية أن يفقد هذا النظام طاقته تدريجيًا، وهذا الفقد للطاقة ينبغي أن يتسبب في اضمحلال مدارات هذين النجمين النيوترونيين.

وقد تم اكتشاف أول نجمين نابضين ثنائيين بواسطة راسل هالس وجوزيف تايلور في عام ١٩٧٤. وقد رصد هالس وتايلور بعناية مدارات النجمين النيوترونيين، واكتشفا أن الفترة المدارية تتناقص في الواقع وكأنما يفقد النظام طاقته. وعلاوة على ذلك، فإن الفترة المدارية تتناقص بالضبط حسب المعدل الذي نتنبأ به عندما نفترض أن فقدان الطاقة يعود إلى موجات الجاذبية. وقد دلت تلك الملاحظات بشدة على الوجود الفعلي لموجات الجاذبية وعليه فإن هالس وتايلور قد منحا جائزة نوبل في الفيزياء في عام ١٩٩٣. وقد دلت الملاحظات المستمرة للثنائي هالس وتايلور إلى المزيد من التأكيد على تنبؤات النسبية العامة، وقد وجد علماء الفلك منذ ذلك الحين أنظمة مماثلة أمدتهم بمزيد من التحقق.

هل كان نيوتن على خطأ؟

لقد تطرقنا إلى قضايا مهمة كثيرة قدمت فيها النسبية العامة لأينشتاين تنبؤات تختلف عن تنبؤات نظرية نيوتن القديمة للجاذبية. وفي كل واحدة من هذه القضايا أكدت الملاحظات أن نظرية أينشتاين هي التي على صواب. ومع وضع

هذه الحقيقة في الاعتبار، من الجدير أن نسأل: هل يعني النجاح الذي أصابته نظرية أينشتاين أن نظرية نيوتن كانت خاطئة؟

تعتمد الإجابة إلى حد ما على كيفية تعريفك "للخطأ"، ولكن هذا السؤال يكشف لنا عن تأملات مهمة في طبيعة العلم.

وفي كل الحالات التي قدمت فيها نظرية أينشتاين ونظرية نيوتن إجابات مختلفة، فإن الملاحظات قد بينت بوضوح أن إجابات نيوتن كانت غير صائبة. ولكن من المهم أن نتذكر أن الحلول التي تقدمها النظريتان لمعظم القضايا، لا يمكن التفريق بينها تقريبًا. ولذلك فإن الفلكيين ما زالوا يستخدمون قانون نيوتن للجاذبية لحساب مدارات الكواكب حول النجوم ودوران النجوم حول مراكز مجراتها ودوران المجرات حول بعضها البعض. ولهذا السبب أيضًا، وفي أثناء الحادثة المؤسفة الشهيرة لمهمة سفينة الفضاء **أبوللو ١٣** (المؤرخة في فيلم يحمل نفس الاسم) استطاع رائد الفضاء جيم لوفيل أن يقول عن حق، "لقد أجلسنا للتو السير إسحق نيوتن على مقعد القيادة" عندما أطفأوا كل آلاتها. وفي الغالبية العظمى من القضايا التي صادفناها في كل الأوقات، قامت نظرية نيوتن للجاذبية بوظيفتها إلى حد كبير جدًا كنظرية أينشتاين.

وطبقًا لذلك الاعتبار، تأتي مسألة الصواب والخطأ بالنسبة لأية نظرية من المتطلبات العلمية لقابليتها للاختبار. وعندما يتم استخدام مصطلح "نظرية" بصورة صحيحة فإنه يشير إلى فكرة ما قد اجتازت كل الاختبارات التي أجريت عليها حتى تاريخه، ولا يعني هذا بالضرورة أنها ستستمر في اجتياز كل الاختبارات المستقبلية. وعندما نتأمل تلك العبارة المأثورة "ما طار طير وارتفع إلا كما طار وقع"، وكنا نفكر فيها كجزء من نظرية للحركة على الأرض، فإنها عبارة جيدة جدًا؛ ولتحاول قدر استطاعتك رمي شيء بقوة كافية تمنع سقوطه إلى أسفل، فلن

تستطيع ذلك أبدًا. ومع ذلك، فمنذ أن قدم نيوتن نظريته في الجاذبية اكتشفنا أنها غير مكتملة. إنها تعمل جيدًا عندما نتعامل مع المقذوفات العادية، ولكنها تنهار عند التعامل مع إطلاق الأجسام بسرعة كافية بحيث تصل إلى سرعة الهروب من الجاذبية. وبقدر مساو من الأهمية، فإن نظرية نيوتن قد قدمت لنا تصورًا عقليًا جديدًا بالنسبة للأجسام التي ترتفع وتنخفض في حركتها تحت تأثير الجاذبية ولم تعد مقصورة على المقذوفات على سطح الأرض، ولكنها بدلا من ذلك امتدت لتشمل حركة الأجسام في السماوات.

وعلى نفس المنوال فإن نظرية أينشتاين لم تلغِ عمل نظرية نيوتن في القضايا التي تتناولها بصورة جيدة، إنها توضح لنا فقط أن نظرية نيوتن غير كافية في حل بعض القضايا، حيث إنها قد أمدتنا بصورة عقلية جديدة عن الجاذبية أزالت فكرة "التأثير الشبحي عن بعد" التي اعتبرها نيوتن نفسه غير معقولة. ونظرية أينشتاين قد تكون غير مكتملة؛ وفي الحقيقة، فإننا سنناقش في فصل ٧، ما يبدو على أنه انهيار لها عندما نحاول تطبيقها على مركز أي ثقب أسود. وبالنسبة للعلماء، تكمن الإثارة في تلك الانهيارات النظرية، لأنها قد تقودنا إلى نظريات جديدة قد تقدم استبصارا أعمق للطبيعة. ولكننا عندما نجد نظرية أفضل، إذا وجدت، فإن الأساس المهيب للبرهان الذي يدعم نظرية أينشتاين سيظل شامخًا. ويلقى هذا عبئًا كبيرًا على أية نظرية بديلة، حيث إنها يجب أن تقدم نفس الحلول التي قدمتها نظرية أينشتاين بالنسبة للقضايا التي تناولتها النسبية العامة.

والخلاصة، إن إجابتي عن السؤال "هل كان نيوتن على خطأ؟" هي لا. قدم لنا نيوتن نظرية قوية للجاذبية والحركة، وكان على "صواب" وتم عمل الملاحظات والتجارب على نظريته في زمنه. والعلم صرح ضخم، وكل حجر يُبنى في وقته. وما دام نرص الأحجار بعناية، فسنكون قادرين دائمًا على المزيد من البناء، ولن

نحتاج إلى إزالة أية أحجار موضوعة من قبل. ويمكننا أن نتأمل بعض الشيء في الاستعارة الرائعة في كلمات السير إسحق نيوتن نفسه: "إذا كنت قد استطعت أن أرى أبعد من الآخرين، فذلك لأنني وقفت على أكتاف عمالقة". وقد لحق أينشتاين من خلال نظرياته في النسبية بنيوتن والعمالقة الآخرين، وفي يوم ما سيقف آخرون فوق أكتافهم أيضًا.

الجـــزء الرابع

نتائج النسبية

(٧)

الثقوب السوداء

خلال الفصول العديدة السابقة، ناقشنا الأسباب التي تقف وراء العديد من الظواهر التي اختبرتها في رحلتك إلى ثقب أسود. وقد رأينا السبب في مرور وقت أقل بالنسبة لك أثناء رحلتك من الوقت الذي مر بالناس على الأرض. وتعلمنا أن تركيب الزمكان الموجود على مسافة من أية كتلة يعتمد فقط على مقدار الكتلة، ولهذا السبب استطعت أن تدور حول الثقب الأسود على مسافة كما لو كنت تدور حول أحد النجوم، دون خوف من أن يتم ابتلاعك فيه. وقد اكتشفنا أن بطء الزمن والانزياح بفعل الجاذبية إلى اللون الأحمر الذي لاحظته عندما شاهدت ساعتك تسقط باتجاه الثقب الأسود هي نتائج متوقعة للفكرة البسيطة التي تقع في جوهر نظريات أينشتاين، بما في ذلك أن كل الحركات نسبية، وأن سرعة الضوء ثابتة، وآثار التسارع مكافئة لآثار الجاذبية.

والسؤال الذي لم نناقشه حتى الآن هو ماذا يكون بالضبط الثقب الأسود، وما الذي سيصادفه زميلك عندما اندفع عبر أفق الحدث؟ ولذلك دعونا نهمل هذه الأسئلة الآن، ونكمل قصة الرحلة التي شرعت فيها في فصل ١.

الثقوب في الكون

انظر إلى الوراء إلى شكل (٦-٣)، الذي يوضح مثال الملاءة المطاطية التي تشرح مدارات الكواكب حول الشمس، وتخيل ما يحدث عندما تصبح الشمس مضغوطة جدًا بطريقة ما، وذلك دون أن تتغير كتلتها. يمكنك الوصول إلى الفكرة

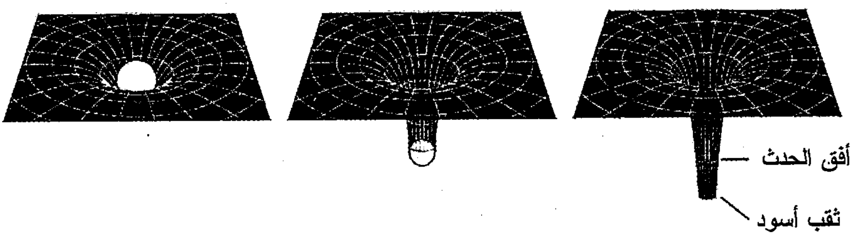
بتخيل ما يحدث إذا وضعت وزنًا كثيفًا فوق الملاءة المطاطية؛ أن تستبدل على سبيل المثال كرة منفوخة وزنها ٥ كيلوجرامات بقطعة من الحديد وزنها ٥ كيلوجرامات. من الواضح، أن الملاءة المطاطية ستصبح مشوهة بصورة أكبر في موضع ذلك الوزن الكثيف. ومع ذلك، فإنك إذا نظرت إلى مناطق بعيدة نسبيًا عن هذا الوزن، فإن التشوه في الملاءة المطاطية لن يتغير لأن الوزن الكلي لم يتغير.

ويوضح شكل (٧-١) هذه الفكرة. المخطط الأيسر يبين الشمس فوق ملاءة مطاطية. والأوسط يوضح كيف أن الملاءة المطاطية ستتغير إذا أصبحت الشمس مضغوطة بصورة زائدة. وإذا واصلت ضغط الشمس، فإنها ستضغط أكثر وأكثر على الملاءة المطاطية والذي يعادل في تشبيهنا المزيد والمزيد من انحناء الزمكان. وإذا ضغطت الشمس بما فيه الكفاية، فإنها بالأحرى ستندفع إلى أسفل الملاءة المطاطية حتى تفتح ثقبًا في الملاءة. وعلى الرغم من أن التشبيه ينهار عند هذه النقطة (ومرة ثانية، لا ينبغي أن نأخذ تشبيه الملاءة المطاطية بشكل حرفي تمامًا)، ولكن فكرته العامة ما زالت تنطبق على الزمكان: بضغط كاف على الشمس، سيصبح الزمكان أكثر انحناء إلى حد كبير إلى درجة أنه سيخلق بالطبيعة ثقبًا في الكون المرئي. والاسم **ثقب أسود** أصبح له الآن معنى: إنه **أسود** لأنه لا يسمح لأي ضوء بالهروب منه، وأنه **ثقب** بمعنى أن الأجسام التي تقع فيه لن نستطيع أن نشاهدها بأية تكنولوجيا يمكن تصورها.

إذا استمر ضغط الشمس، فإن الانحناء سيصبح كبيرًا بما يكفي لخلق ثقب أسود في الكون

إذا تم ضغط الشمس، فإن الزمكان سيصبح أكثر انحناء قرب سطحها، ولكن دون تغيير على ما هو بعيد عنها.

الملاءة المطاطية تمثل الانحناء الزمكاني حول الشمس اليوم



شكل (١-٧)

عند ضغط الشمس دون تغيير كتلتها سيزيد تشوه منطقة الزمكان قرب الشمس. وإذا أصبحت الشمس كثيفة بما فيه الكفاية فإنها ستخلق بالضرورة ثقبًا في الكون المرئي ثقبًا أسود.

أفق الحدث

الثقوب السوداء لها داخل وخارج، وبمقدورك أن تفهم ذلك عندما تعود إلى التفكير في الساعة المربوطة بصاروخ التي أسقطتها في اتجاه الثقب الأسود في فصل ١. في بداية إرسالها خارج سفينتك الفضائية، فقد كان من السهل على الصاروخ أن يمنع سقوط الساعة وأن يعيدها. وعندما استمر سقوطها إلى الثقب، فإن الجاذبية الأقوى – أو، مكافئها، الانحناء الأكبر للزمكان – يتطلب أن يزيد الصاروخ دوران محركاته بقوة أكثر بكثير حتى يمنع السقوط ويعكسه. وفي النهاية، سيصل الصاروخ والساعة إلى "نقطة اللا عودة" وعندها لا يوجد مقدار من القوة يستطيع أن يمنعهما من الاستمرار في السقوط، وعندها فحتى الضوء لا

يستطيع أن يهرب ليعود إلى الكون الخارجي. نقطة اللا عودة هذه هي **أفق الحدث** التي ناقشناها سابقًا في فصل ١[١]. واتخذت هذا الاسم لأن الأحداث التي تقع داخلها لا يمكن أن تُرى من الكون الخارجي أو تؤثر فيه.

لاحظ أنك ستسمع غالبًا أن أفق الحدث يتم توصيفه بأنه الموضع الذي تصبح فيه الجاذبية قوية جدًا لدرجة أن سرعة الهروب تصل إلى سرعة الضوء. ومع ذلك، فإن هذه ليست الطريقة الأفضل للتفكير حولها، لأنها تجعل الأمر يبدو كما لو أن أشعة الضوء "تقريبًا" ستصبح قادرة على أن تهرب بطريقة تشبه كثيرًا طريقة هروب صاروخ ليست لديه سرعة هروب كافية ليهرب (بالكاد) من سطح الأرض. ولكن الضوء لا يشبه الصاروخ الذي يتسارع ليبدأ في الصعود ثم يتباطأ ويعود، حيث إن الضوء يجب أن ينتقل دائمًا بنفس سرعته. ونتيجة لذلك، فإن التشبيه الأفضل هو تشبيه النهر والشلال، وفيه يتدفق الفضاء نفسه في اتجاه الثقب الأسود[٢]. (وفكرة "الفضاء المتدفق" قد تبدو غريبة، ولكنها تثبت في النهاية أنها صحيحة رياضيًا لوصف سلوك الزمكان قرب ثقب أسود). وبعيدًا عن الثقب الأسود فإن "نهر" الفضاء يتدفق ببطء شديد لدرجة أنك لا تستطيع أن تلاحظه. ولكن عندما تقترب من أفق الحدث، فإن النهر يتحرك بسرعة أكثر من أي وقت مضى مما يزيد ويزيد من صعوبة التجديف ضد التيار. وأفق الحدث نفسه عبارة

---

(١) أفترض هنا، ثقبًا أسود لا يدور، فالثقب الأسود الذي يدور له هندسة زمكانية أكثر تعقيدًا ستضيف تأثيرات أخرى قرب أفق الحدث (الذي ينقسم في الحقيقة إلى أفق حدث داخلي وأفق حدث خارجي)، ولكن ذلك لا يغير من الأفكار الأساسية لمناقشتنا.

(٢) هذا التشبيه قدمه من جامعة كولورادو الأستاذ أندرو هاميلتون، مرسومًا بطريقة جميلة في عرض فيلم يمثل النظام الشمسي الثقوب السوداء: الجانب الآخر للنهاية (الذي كان هاميلتون مخرجه العلمي). وهو مرسوم أيضًا على موقع هاميلتون على الإنترنت "***Inside Black Holes***".

عن شلال، حيث يذهب الفضاء "إلى حافة هاويته" بمعنى أنه يتدفق إلى الثقب الأسود بسرعة كبيرة جدًا لا يستطيع معها حتى صاحب مجداف يتحرك بسرعة الضوء أن يظل ثابتًا فوق سطح الهاوية. ويعيدنا هذا التشبيه إلى مناقشاتنا المبكرة حول الثقب الأسود و"ابتلاعه". وبعيدًا عن الثقب الأسود، حيث لا يوجد أي تدفق ملحوظ للفضاء، فإن المدارات يمكن حسابها من قانون نيوتن العالمي للجاذبية، ومن الواضح جدًا أن الثقب الأسود لن "يبتلعك إلى داخله". ومع ذلك، فعندما تقترب جدًا فإن تدفق الفضاء سيصبح في نهاية الأمر قويًا جدًا لدرجة ستشعر معها **وكأنك** "تبتلع إلى داخله". ومع ذلك فإن الثقب الأسود لن يبتلعك إلا إذا كانت البركة الموجودة في قاع الشلال تبتلع من يسقط فيها. إنك تمضي فوق الشلال، لأن ذلك هو الطريق الذي يتدفق إليه النهر الذي يحيط بك، وتسقط إلى داخل الثقب الأسود لأنك محمول فوق الفضاء الذي حولك، ولا توجد مكنسة كهربائية كونية تبتلعك إلى داخله.

وهناك طريقة أخرى للتفكير في أفق الحدث عن طريق تطبيق ما تعلمناه من النسبية العامة حول تمدد الزمن والتحول الطيفي إلى اللون الأحمر بفعل الجاذبية. ولتتذكر، أنه كلما زادت قوة الجاذبية فإن الوقت يزداد بطئًا ويزداد التحول الطيفي للضوء إلى اللون الأحمر. وإذا مضيت مع هذه الفكرة إلى نهايتها، فإنك قد تتخيل أنه قد يوجد مكان ما حيث تكون الجاذبية فيه قوية جدًا، لدرجة أنه على الأقل من منظور الملاحظ الخارجي، فإن الزمن يتوقف والضوء يصبح منزاحًا نحو اللون الأحمر بشكل لا نهائي. وعلى قدر ما تبدو هذه الفكرة غريبة فإنها تصف ما قد تلاحظه عند أفق حدث الثقب الأسود. ولهذا السبب فبينما كانت ساعتك تسقط في اتجاه أفق الحدث للثقب الأسود في فصل ١، فإن ضوءها قد أصبح أحمر، وازداد انزياحه أكثر وأكثر إلى اللون الأحمر حتى اختفت عن ناظريك، وعندما حدث ذلك، فقد أدركت أن الزمن قد توقف على واجهة الساعة.

ونأتي الآن إلى آخر فكرة في فصل واحد التي لم نتناولها حتى الآن بالشرح: مصير زميلك المتحمس الذي قام بالغوص في الثقب الأسود. وإذا تجاهلنا موته نتيجة قوى الشد والجذب، فمن وجهة نظره أنه قد اندفع عبر أفق الحدث إلى الثقب الأسود في وقت قصير بشكل مطلق. ويجب الآن أن يصبح لهذا الكلام معنى. تذكر عندما كانت سفينتك الفضائية الصاروخية تتسارع خلال الفضاء أو على الأرض تحت تأثير الجاذبية (انظر شكل ٦-٨)، فقد لاحظت أن وقت آل يمضي بطيئًا، ولكنه كان يعتبر أن وقته يمضي بصورة طبيعية. وتصل هذه الفكرة نفسها الآن إلى أقصاها أثناء اندفاع زميلك في اتجاه الثقب الأسود. فمن وجهة نظرك وأنت في مدار الثقب الأسود، فإن وقته يبطئ ويبطئ حتى يتوقف عند أفق الحدث، ولهذا السبب فإنك لن تراه في الحقيقة أبدًا يصل إليه أو يعبره. ومع ذلك، فمن وجهة نظره، يبدو وقته دائمًا يسير بصورة طبيعية، ولا يشعر بأي شيء خاص أثناء انسياقه عبر أفق الحدث. وسيستمر في الاندفاع سريعًا باتجاه مركز الثقب الأسود.

وعلى نحو مختصر، يحدد أفق الحدث في جوهره الحد بين داخل الثقب الأسود والكون الخارجي. وعند مشاهدته من الخارج، فإن أفق الحدث له ثلاث صفات أساسية: إنه الموضع الذي تصبح عنده العودة مستحيلة إلى الكون الخارجي، والموضع الذي يبدو أن الزمن يصل فيه إلى التوقف، والموضع الذي يصبح فيه الضوء منزاحًا إلى اللون الأحمر بصورة لا نهائية. ولكنه ليس حدًا فيزيائيًا. وبالنسبة لجسم يسقط إلى داخل الثقب الأسود، فإن أفق الحدث هو مجرد موضع لا يمكن من بعده الاتصال بالكون الخارجي حيث يتقدم هذا الجسم في اتجاه أي مصير ينتظره داخل الثقب الأسود.

خواص الثقب الأسود

كما قد ناقشنا، فإن الشمس من حيث المبدأ يمكن أن تصبح ثقبًا أسود إذا ضغطناها بما فيه الكفاية. وعندئذ، ماذا ستصبح عليه المادة التي تتكون منها الشمس؟ إنها ستختفي داخل الثقب الأسود، ولذلك لن تعود "مادية" بأي معنى طبيعي. ومن ناحية الجوهر، فإن الشمس السابقة ستصبح كتلة لا جسم لها متسببة في انحناء الزمكان.

ويقودنا هذا إلى التساؤل حول ما يمكن أن تراه إذا نظرت إلى ثقب أسود. ولا تدع المخططات التي ذكرناها حول الملاءة المطاطية تخدعك. فالثقب القمعي الشكل هو مجرد تشبيه ثنائي الأبعاد. وفي الحقيقة، إنك إذا كنت قريبًا بما يكفي لثقب أسود لتكون قادرًا على رؤيته، فإنك سترى كرة سوداء ثلاثية الأبعاد وبحجم يحدده أفق حدثها، الذي سيكون كرويًا أيضًا[١]. ومن ناحية المبدأ، فإنك تستطيع قياس محيط أفق الحدث، ومنه تستطيع أن تحسب نصف قطر الدائرة التي لها ذلك المحيط. ويُسمى نصف القطر هذا، **نصف قطر شفارتزشيلد** ***Schwarzschild radius***، وهو ما نستخدمه عادة لوصف حجم ثقب أسود. وتأتي تسميته من حقيقة أن أول من قام بحسابه هو كارل شفارتزشيلد، والذي قام بتقدير هذا الحساب في غضون شهر من نشر أينشتاين النظرية العامة للنسبية. وللأسف، فإن شفارتزشيلد قد مات بعد أقل من عام، من عدوى مرضية أثناء دوره كجندي ألماني في الحرب العالمية الأولى.

---

(١) سيكون الثقب الأسود كرويًا تمامًا إذا كان لا يدور؛ والثقب الاسود الذي يدور يكون ممطوطًا على هيئة شكل بيضاوي (شبيه بكرة القدم الأمريكية). لاحظ أيضًا أنه على الرغم من أن الشكل الحقيقي للثقب الأسود بسيط، فإن أنماط الضوء التي تراها حوله قد تكون معقدة تمامًا بسبب حقيقة أن جاذبيته تسبب انحناء الضوء الذي يمر قريبًا منه.

ويتوقف نصف قطر شفارتزشيلد للثقب الأسود على كتلته فقط ومعادلة حسابه يتكشف أنها بسيطة جدًا في الاستخدام: إنها تساوي تقريبًا ٣ كيلومترات مضروبة في كتلة الثقب الأسود في حالة الكتل الشمسية. وعلى سبيل المثال، ١-كتلة شمسية لثقب أسود (أي، ثقب أسود له نفس كتلة شمسنا) له نصف قطر شفارتزشيلد يساوي نحو ٣ كيلومترات، و١٠-كتلة شمسية لثقب أسود لها حوالي نصف قطر يساوي ٣٠ كيلومترًا، ولتضع في اعتبارك أنه بينما يمكن استخدام نصف قطر شفارتزشيلد لحساب محيط أفق الحدث أو حجم الفضاء الذي يبدو أن الثقب الأسود يشغله، فإنك لا تستطيع في الحقيقة قياس نصف قطر شفارتزشيلد مباشرة. والسبب، بالطبع، هو أن الزمكان يكون مشوشًا جدًا داخل أفق الحدث إلى درجة أن فكرة نصف القطر لا يعود لها معنى.

وفكرة أن الثقب الأسود هو أساسًا كتلة بلا جسد تعني أن الثقوب السوداء هي أجسام بسيطة جدًا، على الأقل فيما يتعلق بما قد نعلمه عنها من الخارج. وعلى سبيل المثال، تخيل أن لديك جسمين لهما كتلة الشمس، أحدهما هو نجم طبيعي والآخر هو ماسة عملاقة. فإذا انكمش كلاهما بطريقة ما ليكونا ثقبين أسودين، فإنك لن تعود قادرًا على تمييز الاختلاف بينهما؛ وسيصبح كلاهما ببساطة ثقبين أسودين لهما كتلتان تتساويان مع كتلة الشمس.

وفي الحقيقة، فإن الثقب الأسود إلى جانب كتلته، يحتفظ بخاصيتين أخريين فقط مهما كان الذي تشكل منه أو سقط فيه: الشحنة الكهربية ومعدل الدوران. وليس من المتوقع أن تلعب الشحنة الكهربية دورًا مهمًا، لأن أية شحنة موجبة أو سالبة صرفة قد يحتويها الثقب الأسود سيتم معادلتها سريعًا حيث ستستقطبها الشحنات المضادة للغاز بين النجوم. والدوران له تأثيرات مهمة قرب أفق الحدث، ولأننا نتوقع أن معظم الثقوب السوداء تدور بسرعة (بسبب الكيفية التي نظن أنها

تكونت بها)، وينبغي على العلماء الذين يدرسون الثقوب أن يضعوا تلك التأثيرات في حسبانهم. ومع ذلك، فإن الدوران له تأثير ضئيل جدًا بمجرد أن تنتقل بعيدًا عن المحيط المباشر لأفق الحدث، ونحن لن نناقش تأثيراته في هذا الكتاب.

من الغريب جدًا أن يكون ذلك حقيقيًا

على الرغم من أن شفارتزشيلد قد اكتشف معادلة نصف قطره المشهورة في عام ١٩١٦، فإن معظم الفلكيين كانوا يشكون في أن الثقوب السوداء قد تكون موجودة بالفعل لعدة عقود بعد ذلك[1]. وكانت المشكلة الرئيسية أن فكرة الثقب الأسود قد بدت غريبة جدًا على التصديق. إلا أنه كانت هناك مشكلة ثانوية، فبينما يمكن بسهولة حساب أنصاف أقطار شفارتزشيلد، فإن الفلكيين لم يعرفوا أبدًا الطريقة التي يمكن لجسم حقيقي بها أن يصبح مضغوطًا للغاية.

ونحتاج لكي نفهم هذه الفكرة، أن ننظر بطريقة أعمق قليلا في معنى نصف قطر شفارتزشيلد. وعلى الرغم من أننا نربطه في الوقت الراهن بحجم ثقب أسود حقيقي (أو متوقع)، فإنه فعليًا مجرد رقم يدلنا إلى أي قدر صغير نحتاج أن نضغط كتلة لتتحول إلى ثقب أسود. وعلى سبيل المثال، عندما نقول أن الشمس لها نصف قطر شفارتزشيلد هو ٣ كيلومترات، فإننا في الحقيقة نعني أن الشمس ستصبح ثقبًا أسود إذا كنا نستطيع بطريقة ما أن نضغطها حتى يصل نصف قطرها الحالي الذي يساوي ٧٠٠٠٠٠ كيلومتر إلى ٣ كيلومترات فقط؛ وعند هذه النقطة، ستختفي الشمس داخل أفق حدثها. وفي الحقيقة، أنك تستطيع حساب نصف قطر شفارتزشيلد **لأية** كتلة. فالأرض، التي كتلتها نحو ١/ ٣٠٠٠٠٠ من كتلة الشمس،

---

(١) مصطلح "الثقب الأسود" لم يستخدم فعليًا حتى عام ١٩٦٧، عندما صاغه جون آرشيبالد ويلر. وقبل ذلك استخدم العلماء مجموعة متنوعة من المصطلحات الأخرى (مثل "حفرة سوداء" أو "نجم أسود) لوصف نفس الموضوع.

لها نصف قطر شفارتزشيلد يساوي ١ سنتيمتر (الذي هو ١/ ٣٠٠٠٠٠ من ٣ كيلومترات)، مما يعني أن الأرض ستصبح ثقبًا أسود إذا استطعنا أن نضغطها إلى حجم بلية صغيرة. **وحتى** أنت لك نصف قطر دائرة شفارتزشيلد، والذي اتضح أنه ١٠ بلايين مرة أصغر من نواة الذرة تقريبًا؛ وبعبارة أخرى إذا قمنا بطريقة ما بضغطك إلى ذلك الحجم الصغير فإنك ستختفي داخل الثقب الأسود الضئيل الخاص بك.

والسؤال الرئيسي الذي يتعلق بوجود الثقوب السوداء، إذن، هو ما إذا كانت هناك أية وسيلة في الطبيعة لضغط الأجسام إلى أحجام أصغر من أنصاف أقطارها الشفارتزشيلدية. وقد جاءت الإجابة المهمة بأن هذا قد يكون ممكنًا في بعض الحالات، عن طريق الحسابات التي أجراها في عام ١٩٣١ الفيزيائي سوبرامانيان تشاندراسيخار (والذي سمي باسمه مرصد تشاندرا ناسا للأشعة السينية). وبمرور الزمن تعرف الفلكيون على وجود نجوم عديدة **قزمية بيضاء** (***white dwarf star***)، والتي هي أجسام كتلتها مماثلة لكتلة الشمس ولكنها مضغوطة إلى أحجام لا تزيد عن حجم الأرض. وكثافة النجوم القزمية البيضاء عالية – فمقدار ملعقة شاي صغيرة من المادة القزمية البيضاء قد يزيد وزنها على وزن شاحنة صغيرة إذا أحضرناها إلى سطح الأرض – وهو ما كان مثيرًا لدهشة رواد الفضاء، ولكن حسابات تشاندراسيخار توحي بأنه قد توجد أيضًا أجسامًا أكثر كثافة. وهو على الأخص، قد اكتشف وجود كتلة محتملة قصوى للنجوم القزمية البيضاء؛ وقام لاحقًا بتحسين حساباته الأصلية وأوضح أن هذا **الحد القزمي الأبيض** ***white dwarf limit*** (ويسمى أيضًا **حد تشاندراسيخار**) ويساوي تقريبًا ١,٤ من كتلة الشمس. ويقتضي هذا أنه إذا كانت المادة القزمية البيضاء لها كتلة أكبر من هذا الحد، فإنها لن تستطيع أن تدعم نفسها ضد جاذبيتها الخاصة، ولذلك فإنها ستتقلص في الحجم بصورة أكبر.

وبعد بضع سنوات من نشر تشاندراسيخار لعمله، قام العديد من العلماء الآخرين بالبحث بصورة مستقلة عما يحدث للنجم القزمي الأبيض عندما يزيد في الكتلة حتى يتجاوز الحد القزمي الأبيض. ووجدوا أن مثل ذلك الجسم سيتقلص وعندها ستتحد الإلكترونات والبروتونات الموجودة في ذراته لتشكل كرة من النيوترونات ينتج عنها ما يُسمى **نجمًا نيوترونيًا**_*neutron star*. وقد اعتبر معظم رواد الفضاء أنه من الغريب جدًا أن نظن أن النجوم النيوترونية حقيقية، ولكن على الأقل، اثنين منهما (ولا سيما، فريتز زفيكي وفالتر بادي) اقترحا بأن ذلك قد يكون منتجًا طبيعيًا ثانويًا لانفجارات نجم كبير – الانفجارات الضخمة التي تحدث في نهاية حياة النجوم التي تكون كتلتها هائلة – وهي فكرة قد ثبت لاحقًا أنها صحيحة. (تذكر من فصل ٦ أننا قد اكتشفنا نظمًا ثنائية تتكون من نجمين نيوترونيين، وأن الانهيار المداري لهذه النظم يمدنا بدليل واضح على وجود موجات الجاذبية).

وإذا كنت تتساءل لماذا تبدو فكرة النجم النيوتروني غريبة جدًا، فعليك أن تلاحظ أن النجم النيوتروني النموذجي له كتلة أكبر من كتلة الشمس المضغوطة ومعبأ في حجم نصف قطره يساوي ١٠ كيلومترات فقط. يمكنك الاستعانة بهذه الحقيقة لتوضيح أن للنجوم النيوترونية كثافة لا يمكن تصورها – فملعقة شاي صغيرة من مادة نجم نيوتروني يزيد وزنها على وزن جبل كبير على سطح الأرض – ولكن هناك طريقة أفضل لإدراك الجاذبية المدهشة للنجم النيوتروني هي أن تتخيل ما قد يحدث عند ظهور أحد هذه النجوم بصورة سحرية على كوكب الأرض. بسبب **حجمه** النسبي الصغير، سيمكن وضع النجم النيوتروني بسهولة داخل تخوم العديد من المدن الكبيرة، ولكنه لن يستقر فيها قط. وبدلا من ذلك، ولأن كتلة النجم النيوتروني هي أكبر مئات الآلاف من المرات من كل الأرض، فإن الأرض "ستتساقط" على سطح النجم النيوتروني، وتتضغط إلى النجم

النيوتروني في هذه العملية. ومع الوقت فإن الغبار الباقي للأرض السابقة سينسحق إلى غلاف كروي أصغر في سمكه من إبهامك على سطح النجم النيوتروني.

ونعود إلى قصتنا الرئيسية، فحقيقة أن بعض العلماء قد ظنوا أن النجوم النيوترونية لا يمكن أن تكون واقعية لم توقفهم عن محاولة حساب خواصها. وفي عام ١٩٣٨، قرر روبرت أوبنهايمر، الذي أصبح لاحقًا قائد مشروع منهاتن (مشروع الحرب العالمية الثانية الذي قام ببناء أول قنبلة ذرية)، أن يبحث فيما إذا كانت للنجوم النيوترونية كتلة قصوى تخصها. واستنتج هو وزملاؤه في الحال أن الإجابة هي نعم. ووجدوا أنه إذا كان للنجم النيوتروني كتلة تتجاوز مجرد بضع كتل شمسية، فلن يستطيع حتى الضغط الداخلي الذي تقوم به نيوتروناتها أن يوقف تحطيم الجاذبية. وحيث إنه لا توجد قوة معروفة تستطيع أن تعطينا ضغطًا أكبر، فإن أوبنهايمر قد ظن بأن الجاذبية سوف تحطم المادة الموجودة في الثقب الأسود.

وكما هو الحال دائمًا في العلم، فإن التساؤل حول ما إذا كانت النجوم النيوترونية أو الثقوب السوداء موجودة بالفعل، ينبغي أن نجيب عليه بواسطة الأدلة. وقد جاء الدليل الرئيسي الأول من دراسة النجوم القزمية البيضاء. وبعد عدة عقود، اكتشف رواد الفضاء العديد من النجوم القزمية البيضاء. ولا يتجاوز أي واحد منها حسابات الحد المحسوب للكتلة لتشاندراسيخار، مما يوحي أن حده هذا هو حد حقيقي. ولأن العديد من النجوم لها كتلة أكبر من حد الـ ١,٤ للكتلة الشمسية، فإن فكرة أن بعض النجوم ربما تتقلص في النهاية إلى نجوم نيوترونية قد أصبح من اللازم اتخاذها بجدية أكبر.

وجاءت اللحظة الحاسمة في عام ١٩٦٧، عندما اكتشف طالب دراسات عليا بريطاني يدعى جوسلين بيل أول نجم **نابض**، وهو جسم فلكي يرسل موجات راديو تنبض بانتظام مذهل. وكان نجمه النابض الأول يومض بموجات الراديو كل ١,٣ ثانية. وتوقيت الومضات كان أكثر دقة من أية ساعة عرفها الإنسان في جميع

الأوقات، وقبل أن يُسمى نجمًا نابضًا، فإن بعض رواد الفضاء قد أطلقوا عليه بنصف سخرية اسم "*LGM*" بمعنى "الرجل الصغير الأخضر". ومع ذلك، وفي غضون عام تقريبًا، اكتشف رواد الفضاء حقيقة ما يحدث. وكشفت مزيد من البحوث أن النوابض موجودة في مراكز نواتج السوبرنوفا، والتي هي بقايا النجوم الكبيرة التي انفجرت فيها. وبالحساب أدرك رواد الفضاء أن النوابض هي نجوم نيوترونية سريعة الدوران. والسبب في النبضات هو أن النجوم النيوترونية تنزع إلى أن يكون لديها حقول مغناطيسية قوية والتي تجعلها ترسل إشعاعًا على طول محورها المغناطيسي. ولذلك، إذا كان المحور المغناطيسي مائلاِ بالنسبة لمحور الدوران (كما هو الحال بالنسبة لكوكب الأرض، التي تكون فيها الأقطاب المغناطيسية منحرفة عن الأقطاب الجغرافية بعدة مئات من الكيلومترات)، تنساب الأشعة حوله مع كل دورة، بما يشبه كثيرًا الشعاع الدوار الآتي من الفنار. وإذا ما حدث وكان المحور المائل متجهًا بحيث تندفع واحدة من هذه الأشعة باتجاه الأرض، فإننا عندئذ نرى نبضة من الإشعاع مع كل دورة. وسرعة معدل الدوران يساعد أيضًا على تأكيد الحجم الصغير والكثافة التي لا يمكن تصورها للنجوم النيوترونية. ونحن نعلم أن الأجسام لا يمكن أن تكون أكبر من الحجم المفترض للنجوم النيوترونية، لأنه في حالة وجود نصف قطر كبير مع معدل الدوران السريع سيتضمن أن السطح سيتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء. ونحن نعلم أن هذه الأجسام ينبغي أن تكون كثيفة بما يتناسب مع كونها نجومًا نيوترونية، لأنها إذا كانت أقل كثافة، فإن جاذبيتها ستكون ضعيفة جدًا ولن تستطيع منعها من التفتت عند دورانها بسرعات شديدة.

وبعد مواجهة الأدلة الواضحة على الوجود الفعلي للنجوم النيوترونية "التي من الغريب جدًا أن تكون حقيقية"، أصبح رواد الفضاء متفتحين ذهنيًا بصورة أكبر لتقبل احتمالية أن الثقوب السوداء موجودة أيضًا. ولم يمر وقت طويل حتى جاءت الأدلة التي تشير إلى أن هذا هو واقع الحال.

إذا كنت تريد برهانًا على وجود الثقوب السوداء، فإن هناك في الحقيقة خطوتين لذلك. أولاً، تحتاج أن تجد الأجسام التي تكون كثيفة بصورة لا يمكن تصورها، ولكنها تتجاوز حد كتلة النجوم النيوترونية. وثانيًا، تحتاج أن تقنع نفسك أن مثل ذلك الجسم هو في الحقيقة ثقب أسود، وليس أحد الحالات الغريبة للمادة التي تكون فيها مضغوطة أكثر من النجم النيوتروني. والخطوة الأولى يمكن القيام بها عن طريق الملاحظات، ولكن الخطوة الثانية تتطلب، فهمًا للكيفية الفعلية لتكون الثقوب السوداء.

وتتأتى الوسيلة الرئيسية لفهم تكوين الثقب الأسود عند إدراك طبيعة كل الأجسام الفلكية المرتبطة بالصراع الدائم بين قوة جاذبيتها الخاصة، التي تحاول أن تجعلها أصغر، والقوى الداخلية التي يتولد عنها ضغطًا مضادًا يقاوم سحق الجاذبية.

دعونا نبدأ بالأرض. تمسك الجاذبية الأرض كلها وتشكل كوكبنا على هيئة كرة. وإذا كنت تفكر بشكل أعمق حول هذا الموضوع، فربما تتساءل لماذا تتوقف الجاذبية عند هذا الحد. أي لماذا لا تضغط الجاذبية كوكبنا بحيث تكون كثافته أعلى، أو حسب موضوعنا، تستمر في ضغطه حتى يصبح ثقبًا أسود؟ والجواب هو أن الأرض تتكون من ذرات، والقوى بين هذه الذرات (التي تنشأ عن القوى الكهرومغناطيسية التي تعمل بين الجسيمات المشحونة التي تشكل الذرات) تشتد عندما تحاول أن تضغطها معًا. وحجم الأرض كما هي عليه يعود إلى التوازن الطبيعي بين جاذبية الأرض والقوى الموجودة بين الذرات التي تقاوم الجاذبية. وتنطبق نفس الفكرة على الكواكب الأخرى، وكذلك أيضًا على الأقمار والكويكبات والمذنبات. فحجمها دائمًا محدد بالتوازن بين القوة الداخلية للجاذبية والقوة الخارجية الناتجة عن الضغط الناشئ عن حقيقة أن الذرات تحاول مقاومة ضغطها

معًا. والنتائج قد تكون في بعض الأحوال مذهلة، ولاسيما عندما نرى أن الكواكب تتألف في معظمها من الهيدروجين والهيليوم، اللذين يميلان إلى الضغط بسهولة أكثر من الصخور والمعادن. وعلى سبيل المثال، كوكب المشترى له كتلة أكبر ثلاثة مرات من كوكب زحل، ولكن الكوكبين لهما نفس الحجم تقريبًا. والسبب أنك إذا أضفت إلى كوكب المشترى المزيد من الهيدروجين والهيليوم، فإن القوة المتزايدة للجاذبية ستضغطهما إلى كثافة أعلى؛ ولذلك فإنه سيزيد في الكتلة مع زيادة طفيفة جدًا في الحجم. ويردنا هذا إلى سؤالنا التالي "الأكثر عمقًا". تتماثل النجوم تقريبًا في تركيبها للكواكب مثل المشترى وزحل، حيث تتألف في معظمها بالكامل من هيدروجين وهيليوم. ماذا، إذن يجعل المشترى كوكبًا ويجعل الشمس نجمًا؟ ولنجيب عن هذا السؤال، دعونا نفكر حول ما يحدث إذا تناولنا كوكبًا مثل المشترى وأخذنا نضيف كتلة إليه. كلما أضفنا إليه المزيد من الكتلة، فإن جاذبيته ستصبح أقوى، وهذه الجاذبية القوية ستضغط تدريجيًا النواة المركزية لجسمه إلى درجة حرارة وكثافة أعلى. وفي نهاية المطاف، ستصبح تلك النواة ساخنة وكثيفة جدًا، لدرجة أن نوى الهيدروجين سوف تصطدم ببعضها بعضًا، بقوة تكفي لاندماجها معًا. وهذه هي عملية الاندماج النووي التي تجعل النجوم مشرقة. تذكر أن اندماج الهيدروجين يحول الهيدروجين إلى هيليوم ويولد طاقة طبقًا للمعادلة: الطاقة = الكتلة x مربع سرعة الضوء، لأن نوى الهيليوم أقل في كتلتها بصورة طفيفة من نوى الهيدروجين التي صنعتها. وباختصار، فإن كل الاختلافات بين كوكب كالمشترى ونجم، يرجع في سببه فقط إلى الكتلة. وعند وجود كتلة كافية[1]، فأية كرة من غازي الهيدروجين والهيليوم ستصبح نجمًا بصورة حتمية.

---

(١) الحد الأدنى من الكتلة اللازمة لوجود نجم هو ٨% تقريبًا من كتلة الشمس، والتي تعادل نحو ٨٠ ضعفًا لكتلة كوكب المشترى. وإذا كانت الكتلة أقل من ذلك، فعندئذ لن تكون الجاذبية قوية بما يكفي لضغط النواة إلى درجات الحرارة والكثافة المطلوبة لاستمرار الاندماج النووي.

وحجم النجم يحدده نفس النوع من التوازن الموجود بين الجاذبية والضغط الداخلي الذي يحدد حجم الكواكب. ومع ذلك، ففي حالة النجم، فإن معظم الضغط ينشأ عن تدفق الطاقة المتولدة من الاندماج النووي. أي أن الطاقة المتولدة من الاندماج تحافظ على سرعة حركة جزيئات الغاز الموجودة داخل النجم، والتصادم المستمر بين الجزيئات ينتج عنه الضغط الذي يدعم النجم ضد سحق الجاذبية. (وتوفر فوتونات الضوء التي تحمل الطاقة داخل النجم ضغطًا إضافيًا؛ وهذا **الضغط الإشعاعي** يلعب دورًا مهمًا في النجوم عالية– الكتلة). والمشكلة الرئيسية التي ينبغي أن تواجه النجم هي أن الاندماج النووي لا يمكن أن يستمر في توليد الطاقة إلى الأبد. وكلما تقدمت حياة النجم، فإنه يحول تدريجيًا المزيد والمزيد من هيدروجين نواته إلى هيليوم، مما يعني أن الهيدروجين سوف ينفد في نهاية المطاف. ويعتمد الوقت اللازم لحدوث هذا على كتلة النجم. وعلى غير المتوقع، فإن حياة النجوم العالية الكتلة **أقصر** من النجوم منخفضة الكتلة. والسبب هو أن المعدل الذي يحدث به الاندماج في نواة النجم يكون حساسًا جدًا لدرجة الحرارة، فالزيادة الطفيفة النسبية في درجة الحرارة تزيد من معدل الاندماج. والضغط الزائد للجاذبية في النجوم الأعلى في كتلتها يجعل نواتها أكثر سخونة ومعدلات الاندماج فيها أكثر ارتفاعًا، مما يفسر لنا السبب في أن النجوم عالية الكتلة تلمع أكثر بكثير من أبناء عمومتها منخفضة الكتلة. وفي الحقيقة، تحترق النجوم العالية الكتلة من خلال الهيدروجين الموجود بها بمعدل هائل لدرجة أنه قد ينفد منها في مجرد بضعة ملايين من السنين. وفي المقابل، فإن النجم المنخفض الكتلة مثل شمسنا يمكنه أن يشرق بثبات لمدة ١٠ بلايين سنة قبل أن ينفد لبه الهيدروجيني، والنجوم التي لها كتلة أقل من الشمس يمكنها أن تعيش أكثر.

وبغض النظر عن وقت حدوث هذا، تعني نهاية اندماج الهيدروجين نهاية الضغط الذي يدعم نواة النجم ضد سحق الجاذبية. وينبغي لذلك أن تبدأ النواة

المكونة الآن أساسًا من الهيليوم في التقلص[1]. ويرفع هذا درجة حرارة النواة وكثافتها أزيد، وعند نقطة ما ستصبح ساخنة جدًا وكثيفة لدرجة أن نوى الهيليوم تبدأ في الاندماج. وعملية اندماج الهليوم الأساسية تدمج ثلاث نويات من الهيليوم-٤ إلى نواة كربون-١٢ واحدة، ولذلك فإن النواة تتحول الآن تدريجيًا من كونها مكونة في معظمها من الهيليوم إلى نواة مكونة في معظمها من الكربون. (الرقم بعد اسم العنصر هو رقم الكتل الذرية، الذي هو مجموع أرقام البروتونات والنيوترونات؛ فالهليوم-٤ يتكون من ٢ بروتون و٢ نيوترون، بينما الكربون-١٢ يتكون من ٦ بروتونات و٦ نيوترونات). ومثل اندماج الهيدروجين، فإن عملية اندماج الهيليوم تولد طاقة، وبناء عليه فإنها تعطي النجم مصدرًا جديدًا للضغط الداخلي، وهذا الضغط يوقف الانكماش المتعلق بالجاذبية. ولكن التأجيل يكون بشكل مؤقت فقط، لأن الهيليوم ينبغي أن ينفد. وعندما يحدث هذا، فإن السحق الذي لا هوادة فيه للجاذبية سيتسبب مرة ثانية أن تبدأ النواة في الانكماش. وعادة، ما يصبهر النجم الهيليوم في نحو ١٠% من الوقت الذي يصهر فيه الهيدروجين.

ويعتمد ما يحدث بعد ذلك على كتلة النجم. فالنجم القليل-الكتلة مثل شمسنا، فإن النواة الكربونية هي نهاية المطاف أساسًا بالنسبة لها. وقبل أن تبدأ النواة حتى في أن تصبح ساخنة بما يكفي لاندماج الكربون، فإن الانكماش سيتوقف بشكل من أشكال الضغط مختلف جدًا عن الضغط الذي يدعم النجم عندما يولد الطاقة من

---

(١) القراء الذين درسوا علم الفلك يعرفون أنه أثناء انكماش النواة فإن الطبقات الخارجية للنجم تبدأ فعلا في التمدد، وتتحول في نهاية المطاف إلى نجم عملاق أحمر. والسبب في هذا التمدد هو أنه على الرغم من أن الهيدروجين ينفد في النواة المركزية، التي تتكون عندها أساسًا من الهيليوم، فإن كثيرًا من الهيدروجين يظل موجودًا فوق النواة المركزية. وانكماش النواة والمناطق المحيطة بها يرفع درجة الحرارة بدرجة تكفي لبدء اندماج الهيدروجين الموجود في الطبقة المحيطة بمنطقة الهيليوم، وهذا الاندماج يتم في الحقيقة عند معدل مرتفع (بسبب ارتفاع درجة الحرارة) ويسبب ذلك تمدد طبقات النجم الخارجية.

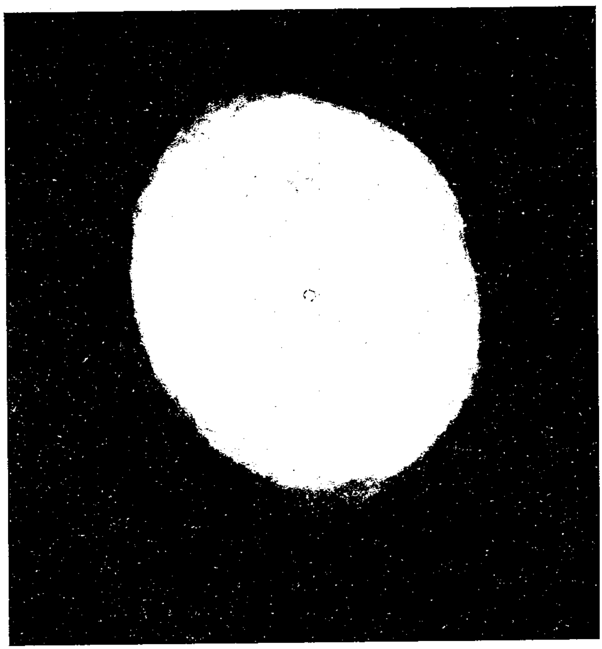
خلال الاندماج. هذا الشكل من الضغط يسمى **ضغط التحلل الإلكتروني** ***electron degeneracy pressure***، والذي يصبح المصدر المهيمن للضغط عندما تصل النواة إلى الكثافة القزمية البيضاء.

والطبيعة الدقيقة لضغط التحلل الإلكتروني هي هامشية إلى حد ما بالنسبة لموضوعنا حول الثقوب السوداء، ولذلك فإنني لن أبدد فيها الكثير من الوقت في هذا الكتاب. ومع ذلك، فإن من يعرفون شيئًا من الكيمياء، فإن ضغط التحلل الإلكتروني هو شكل من أشكال الضغط الذي ينشأ أساسًا للسبب نفسه الذي لا يمكن لاثنين من الإلكترونات أن يتشاركا في نفس مستوى الطاقة في ذرة (الذي يوصف في المصطلحات التقنية **بمبدأ الاستبعاد** ***exclusion principle***). وبعبارة أخرى، فإن نفس الخاصية الإلكترونية التي تفسر ترتيب العناصر في الجدول الدوري الذي سمعت عنه في فصل الكيمياء تفسر أيضًا الضغط الذي ينشأ عندما تقاوم الإلكترونات إجبارها على أن تقترب من بعضها في لب النواة النجمية المضغوطة.

يوضح التحلل الإلكتروني مصير النجوم المنخفضة–الكتلة. وفي الوقت نفسه أساسًا الذي يوقف فيه هذا الضغط انكماش النواة، تتناثر في الفضاء الطبقات الخارجية للنجم. ولبضعة آلاف من السنوات، فإن هذه الطبقات الخارجية تكون مرئية كغلاف متمدد من الغاز حول النجم؛ ونحن نطلق على هذه الأغلفة **سدم كوكبية** (شكل ٧–٢)، وذلك على الرغم من أنه لا توجد لها علاقة بالكواكب. وهذا التناثر يترك نواة النجم مكشوفة ولأن التحلل الإلكتروني قد أوقف تقلص النواة عند الكثافة القزمية، فإن النواة **تكون** قزمية بيضاء عند هذه النقطة. وبعبارة أخرى، فإن القزميات البيضاء هي بقايا "ميتة" للنجوم المنخفضة–الكتلة، التي لن تتقلص إلى أبعد من ذلك لأنها مدعومة دائمًا بضغط التحلل الإلكتروني. ويمكننا الآن أيضًا أن نفسر لماذا لا تكون للقزميات البيضاء أبدًا كتلة تزيد على حد ١,٤ للكتلة الشمسية الذي قام بحسابه للمرة الأولى تشاندراسيخار. تذكر أنه كلما زادت كتلة النجم فإن قوى الجاذبية ستكون أشد في محاولة سحق النواة. وأظهرت حسابات

تشاندراسيخار أنه إذا كانت كتلة النواة تزيد بـ ١,٤ مرة على كتلة شمسنا، فإن جاذبيتها الذاتية ستكون أقوى لدرجة أن ضغط التحلل الإلكتروني لن يستطيع أن يحفظها لمدة أطول من التقلص.

وتمثل القزميات البيضاء بمعنى ما من المعاني، هدنة دائمة بين الضغط والجاذبية. ولكن لأن هذه الهدنة يمكن عقدها فقط في النجوم المنخفضة الكتلة نسبيًا، فإننا نحتاج الآن إلى أن نلتفت إلى مسألة ما يحدث للنجوم العالية-الكتلة.



شكل (٧-٢)

توضح صورة تلسكوب هابل الفضائي هذا المخطط السديمي، كمثال على سديم كوكبي *planetary nebula* ناشئ عن غلاف الغاز المنبعث من نجم يحتضر منخفض- الكتلة. والنواة النجمية المتبقية، المرئية في مركز السديم، هي قزمية بيضاء، وهي جسم تتم فيه مقاومة سحق الجاذبية بواسطة ضغط التحلل الإلكتروني. ناسا/ معهد تلسكوب هابل الفضائي العلمي.

وبالنسبة للنجوم العالية الكتلة، فإن كثافة ودرجة حرارة النواة المنهارة **تصبح** في نهاية الأمر كبيرة بما يكفي لحث الشروع في اندماج الكربون، الذي يساعد النجم على التأجيل المؤقت لسحق الجاذبية. والمنتج الرئيسي لاندماج الكربون هو الأكسجين (لأن العملية تستلزم عادة اندماج هيليوم-٤ مع كربون-١٢، لإنتاج أكسجين-١٦). وعندما ينفد الكربون، فإن الأكسجين من الممكن أن يبدأ في الانصهار، غالبًا إلى نيون، ثم يمكن أن يبدأ النيون في الانصهار، وهلم جرًا. ومع ذلك، ففي تناظر كوني مع الشعار الشهير للجنس الفضائي المُسمى البورج في سلسلة أفلام **جولة بين النجوم**، وفيما يتعلق بالجاذبية فهي كما يقول شعارهم "المقاومة غير مجدية". كل دورة جديدة من الانصهار تستغرق وقتًا أقصر من الدورة التالية، وفي يوم ما فإن ناتج الانصهار سيكون عنصر الحديد. وهذا اليوم سيكون اليوم الأخير للنجم.

والمشكلة أن النجم لا يستطيع توليد طاقة بانصهار الحديد. والحقيقة، إن اندماج الحديد يستنزف بالفعل الطاقة أكثر مما يولدها. ولذلك، فعندما تبدأ النواة المكونة من الحديد في الانهيار، فإنها تنفجر بصورة كارثية. وفي جزء من الثانية، يحرر هذا الانفجار قدرًا هائلا جدًا من طاقة الجاذبية الكامنة، التي تسبب **انفجار** بقية النجم، الذي ينشأ عنه ما نسميه **النجم المتفجر الأعظم** *supernova*. والنجوم المتفجرة العظمى هي أحداث دراماتيكية تستطيع القراءة حولها في أية كتاب عن علم الفلك. أما هنا، فينصب تركيزنا على ما يحدث للنواة المتفجرة.

نحن نعلم الآن أن كتلة النواة كبيرة جدًا ولن يوقف انهيارها ضغط التحلل الإلكتروني، وحيث إن ضغط التحلل الإلكتروني هو خط الدفاع الأخير لمقاومة الإلكترونات عند ضغطها معًا، فلا يوجد أساسًا أي خيار للإلكترونات سوى أن تتحد مع البروتونات لعمل نيوترونات. وتصبح النواة المتفجرة بشكل أساسي كرة

من النيوترونات، التي قد حددناها سابقًا بوصفها نجمًا نيوترونيًا. وبعبارة أخرى، فإن النجوم النيوترونية تتشكل بواسطة النجوم المتفجرة العظمى، مما يفسر لنا السبب في أننا كثيرًا ما نلاحظ النجوم النيوترونية في بقايا النجوم المتفجرة العظمى. ولكن تلك لا تكون النتيجة الممكنة الوحيدة للانفجار النجمي الأعظم. فالضغط الذي يوقف سحق الجاذبية في النجم النيوتروني يسمى **ضغط التحلل النيوتروني** ***neutron degeneracy pressure***، وهو يناظر ضغط التحلل الإلكتروني فيما عدا أنه يحدث مع النيوترونات. وكما ذكرنا سابقًا، فإن أوبنهايمر وزملاءه قد وجدوا أنه يوجد أيضًا حد للقدرة على مقاومة الجاذبية بواسطة ضغط التحلل النيوتروني، وأظهرت الحسابات الحديثة أن هذا الحد يحدث عندما تكون كُتلة النواة في حدود ٣ أضعاف الكتلة الشمسية. فماذا يحدث إذا تجاوز النجم المتفجر هذا الحد النيوتروني النجمي؟ في تلك الحالة، فإن الضغط الذي تمارسه النيوترونات سيكون أقل مما هو ضروري لوقف سحق الجاذبية، مما يعني أن النواة ينبغي أن تستمر في انفجارها الداخلي. وإذا كنت تظن بأن الثقوب السوداء غريبة جدًا على أن تكون حقيقية، فقد تتمنى عندئذ أن تتشكل حالة ما غريبة أخرى للمادة وتخلق نوعًا آخر من الضغط لوقف الانهيار. ولكن لا يوجد مثل تلك المادة أو أي مصدر معروف للضغط. وعلاوة على ذلك، فإن هناك سببين رئيسيين لعدم وجود أية مادة مثل هذه أو إمكانية وجود ضغط.

السبب الأول هو حجة الحجم البسيطة. تذكر أن النجم النيوتروني النموذجي له نصف قطر هو ١٠ كيلومترات فقط تقريبًا، بينما نصف قطر شفارتزشيلد للثقب الأسود ٣-كتلة شمسية هو نحو ٩ كيلومترات (الذي هو ٣ أضعاف نصف قطر شفارتزشيلد للثقب الأسود لـ١-كتلة شمسية). ويعني هذا أنه لا يوجد اختلاف كبير في الحجم بين النجم النيوتروني والثقب الأسود. أي أنه إذا تقلص النجم النيوتروني بقدر ضئيل، فإنه سوف يختفي داخل أفق حدثه ويصبح ثقبًا أسود.

والسبب الثاني الأكثر إقناعًا هو أن للجاذبية حيلة أخيرة في جعبتها. تذكر أن ما تدلنا عليه حقًا معادلة الطاقة= الكتلةx مربع سرعة الضوء هو أن الكتلة والطاقة هما في نهاية الأمر متكافئتان. ولذلك، فإن الطاقة ينبغي من حيث المبدأ أن تكــون مصدر الجاذبية مثلها تمامًا مثل الكتلة. وبالنسبة لمعظم الأجسام، فإن جاذبية طاقتها الداخلية لا تكاد تذكر، ولكن ليس هذا هو الحال في الظــروف القــصوى لانهيــار النواة النجمية عندما تكون الكتلة فوق الحد النجمي النيــوتروني. عندئــذ، تــصبح الطاقة الداخلية المرتبطة بتقلص النواة كبيرة جدًا لدرجة أنها تمارس قــوة جاذبيــة كبيرة تخصها. وهذه الجاذبية الإضافية تدفع إلى الحركــة تغذيــة إيجابيــة مرتــدة لولبية، التي يولد فيها استمرار الانهيار مزيدًا من الطاقة التي تجعل الجاذبية أقوى، مما يطلق المزيد من الطاقة التي تزيد من قوة الجاذبية وهكذا. وفي حدود معرفتنــا لا يمكن لشيء أن يوقف هذه التغذية الإيجابية. وينبغي أن تتقلص النواة إلى مــا لا نهاية، حتى تصبح ثقبًا أسود.

كتل الثقوب السوداء

عملية تكوين الثقوب السوداء التي ناقشناها تبدو أنهــا تتــضمن أن جميــع الثقوب السوداء ستكون لها كتلة تتراوح بين بضعة آلاف وبضع عشرات المــرات ضعف كتلة الشمس، حيث إن تلك هي الكتل التي قد نتوقعها بالنسبة لنوى النجــوم المتقلصة فوق الحد النيوتروني النجمي. ومع ذلك، فكما ناقشنا في فــصل ١، فمــن المعروف أنه توجد فئة ثانية رئيسية للثقوب السوداء: الثقوب السوداء فائقة الكتلــة التي وجدت في مراكز المجرات. والعلماء ليسوا متأكدين تمامًا كيف تكونــت هــذه الثقوب السوداء فائقة الكتلة، ولكنه من السهل تصور الطرق التي تكون قد تــسببت في حدوثها. وعلى سبيل المثال، وبسبب أنها موجودة في المراكز الكثيفة للمجرات،

فإنها قد تكون قد بدأت ببساطة من خلال اندماج العديد من الثقوب السوداء التي تكونت من النجوم المتفجرة العظمى. وعندما تصبح كتلتها كبيرة بما يكفي فإن قوى الشد والجذب التي لديها تصبح أقوى بما يكفي لتفتيت النجوم الأخرى التي تمر بها. والغاز المنبعث من تلك النجوم سيكون عندئذ قرصًا يدور حول الثقب الأسود، والاحتكاك داخل هذا القرص سيسبب تدريجيًا اضمحلال مدارات الجزيئات الفردية إلى أن تسقط في الثقب الأسود، مضيفة إليه المزيد من الكتلة. وعلى أية حال، وبغض النظر عن الميكانيزم الصحيح، لا يوجد في الحقيقة ما يثير الدهشة حول وجود الثقوب السوداء فائقة الكتلة. وبعد كل شيء، إذا كانت الجاذبية قوية بما يكفي للتغلب على كل مصادر الضغط حتى في الأجسام التي لها قدر أقل أو نحو ٣ أضعاف الكتلة الشمسية من المادة، فإنها بإمكانها بالتأكيد التغلب على الضغط في الأجسام التي لها كتلة أكبر.

وعليك أن تفهم الآن ثانية، السبب في أنني قلت في الفصل ١، إنه وبقدر ما نعلم، فإن كل الثقوب السوداء لها كتل ضعف كتلة شمسنا بضع مرات على الأقل. وجاذبية الأجسام منخفضة الكتلة ليست ببساطة قوية بما يكفي للتغلب على جميع أشكال الضغط التي يمكن أن تقاومها. ومع ذلك، اقترح بعض علماء الفيزياء أنه قد توجد حالات يمكن فيها لعمليات أخرى إلى جانب ضغط الجاذبية أن تخلق "ثقوبًا سوداء صغيرة" كتلتها أقل كثيرًا.

وقد اقترحوا وجود نوعين شائعين من الثقوب السوداء الصغيرة. الأول هو نوع من الثقوب السوداء التي قد تكون تكونت أثناء الانفجار العظيم. والفكرة الأساسية هي أن الطاقة الهائلة للانفجار العظيم قد تكون ولدت قوى ساعدت على ضغط الأجسام الصغيرة بدرجة كافية وجعلها ثقوبًا سوداء، حتى إذا كانت جاذبيتها الخاصة غير قوية بما يكفي للقيام بذلك من تلقاء نفسها. وإذا كان هذا صحيحًا فإنه

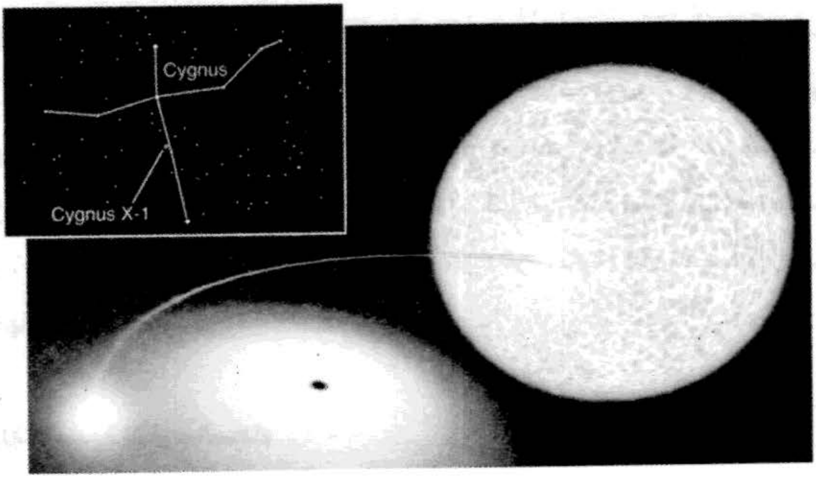
يمكن أن يكون الكون مليئًا بالعديد من الثقوب السوداء التي لها كتل مماثلة لتلك التي للكواكب والنجوم الصغيرة. وقد تم التحقق من هذا الاحتمال من قبل العلماء الذين يحاولون تصور الظروف خلال اللحظات الأولى من **الانفجار الكبير** ***Big Bang***. وعلى الرغم من أننا لا يمكننا استبعاد ذلك تمامًا، فإن معظم النماذج تشير إلى أن تلك الكتل الصغيرة نسبيًا، إن وجدت، فإنها قد تحولت إلى ثقوب صغيرة سوداء. ويبدو أن عمليات البحث الرصدية عن مثل هذه الثقوب (بالبحث عن عدسية الجاذبية التي ستسببها على النجوم الواقعة خلفها) تؤكد عدم وجودها.

والنوع الثاني من الثقوب الصغيرة السوداء يفترض أن تكون صغير جدًا، أنتجها نوع ما من التذبذبات الكمية التي تحدث في نطاق دون ذري. واكتسبت هذه "الثقوب الصغيرة جدًا" المحتملة سمعة سيئة عندما أوردت وسائل الإعلام المخاوف عن أنها قد يتم تخليقها في مصادم الجسيمات الكبير في أوربا، وأنها قد تتسبب في تدمير كوكبنا. وقد عرض بعض الفيزيائيين بالفعل السيناريوهات التي يمكن أن تنتج مثل هذه الثقوب السوداء الدقيقة في "مصادم الجسيمات"، ولكن حتى لو كانوا على حق، فلا يوجد شيء يدعو إلى القلق حولها. والسبب هو أنه في حين أن مصادم جسيمات هادرون الكبير يمكنه توليد الجسيمات من تركيزات من الطاقة أعظم من أية آلة أخرى بناها البشر، فإن الطبيعة روتينيًا تصنع مثل تلك الجسيمات. وينبغي أن تتساقط بعض هذه الجسيمات في بعض الأحيان على الأرض. ولذلك إذا كانت خطرة، فإننا كنا سنعاني من آثارها منذ زمن طويل. وفي حالة ما إذا كنت تتساءل كيف يمكن أن تكون هذه الثقوب السوداء الدقيقة "آمنة"، فإن الإجابة الأكثر قبولا لها علاقة بعملية تسمى إشعاع هوكينج ***Hawking radiation***، التي يرجع اسمها إلى أن أول من اقترحها هو الفيزيائي الشهير ستيفن هوكينج. والتفاصيل معقدة إلى حد ما، ولكن هوكينج أوضح أنه من ناحية الجوهر

فإن قوانين فيزياء الكم تتضمن أن تلك الثقوب السوداء مــن الممكــن أن "تتبخـــر" تدريجيًا بمعنى أن كتلتها تتناقص، وذلك على الرغم من عدم هروب أي شيء أبــدًا من داخل أفق حدثها. ومعدل التبخر يعتمد على كتلة الثقب الأسود، وبالنسبة للثقوب السوداء المنخفضة الكتلة، فإن تبخرها يكون بسرعة أكبر. والنتيجة هي أنــه فــي حين أن معدل التبخر ضئيل في الثقوب السوداء التي لها كتلة تماثل كتلــة نجــم أو أكبر، فإن الثقوب السوداء الدقيقة ستتبخر في جزء من الثانية، قبل وقت طويل مــن تمكنها من أي ضرر.

الأدلة الرصدية للثقوب السوداء

فهمنا الآن طريقة تكوين الثقب الأسود، ويمضي البحث الرصدي عنها قــدمًا إلى حد ما. ونحن نبحث ببساطة عن الأجسام التي تكون كثيفة للغاية، ولكن كتلتهــا أكبر من أن تكون نجومًا نيوترونية.



(شكل ٧ـ٣)

توضح هذه اللوحة تصور فنيًا عن نظام الطائر السيني ١ (*Cygnus X-1*). دوامات الغاز من النجم المصاحب (إلى اليمين) تتجه نحو الثقب الأسود، وتعني درجة حرارتها العالية أنه تنبعث منها أشعة سينية مكثفة. ويمكننا أن نكون واثقين من أن الجسم المركزي المصمت هو ثقب أسود، لأن كتلته أكبر جدًا من أن تكون نجمًا نيوترونيًا. ويوضح الشكل موقع النظام في المجموعة النجمية الطائر (*Cygnus*)، أعيد طبعها من:

Jeffrey Bennett, Megan Donahue, Nick Schneider, and Mark Voit, The Cosmic Perspective, 7th ed. (2014).

وكما ناقشنا في فصل ١، فإن أسهل طريقة للعثور على مثل تلك الأجسام هي بالبحث عن مصادر الأشعة السينية المكثفة. تذكر حالة الطائر السيني ١ (***Cygnus X-1***) الذي لاحظنا أن الأشعة السينية الآتية منه هي من غاز ساخن جدًا

يدور حول جسم مصمت في نظام نجمي ثنائي (شكل ٧-٣). ومن السرعة التي يدور بها الغاز حول الجسم المضغوط، فقد استنتجنا أن الجسم ينبغي أن يكون نجمًا نيوترونيًا أو ثقبًا أسود. ولأن كتلة الجسم تتجاوز الحد النيوتروني النجمي بهامش واسع إلى حد ما (١٥ كتلة شمسية، في مقابل حد ٣-كتلة شمسية) نستنتج أن الطائر السيني ١ يحتوي على ثقب أسود.

والحالة أكثر وضوحًا بالنسبة للثقوب السوداء فائقة الكتلة في مراكز المجرات. تذكر أن كتلة بعض هذه الثقوب السوداء هي من ملايين إلى بلايين المرات ضعف كتلة الشمس مضغوطة في حيز صغير جدًا من الفضاء. وهذه الكتلة هي بشكل كبير جدًا فوق الحد النيوتروني النجمي مما يجعل من الصعب الاعتقاد بأية وسيلة أن هذه الأجسام لا يمكن أن تكون أي شيء إلا ثقوبًا سوداء.

التفرد وحدود المعرفة

كما قد رأينا، يؤيد البرهان بقوة فكرة أن الثقوب السوداء حقيقية وشائعة في الكون. ويعيدنا هذا إلى مسألة ما يكمن في داخلها. من وجهة النظر العلمية، من الصعب جدًا الإجابة عن هذا السؤال. والمشكلة هي أن أفق الحدث يقيم حدًا آخر مهمًا إلى جانب الحد بين داخل الثقب الأسود وخارجه. ولأننا لا نستطيع ملاحظة أي شيء داخل أفق الحدث، فلا توجد أية وسيلة لجمع أدلة عن طريق الملاحظات أو التجربة حول الموجود في داخلها. وبهذا المعنى، يقع ما هو داخل الثقب الأسود خارج نطاق العلم، كما أنه يقع تمامًا خارج الكون المرئي. ومع ذلك، يمكننا أن نستخدم قوانين الفيزياء للتنبؤ بما **ينبغي** أن يحدث داخل الثقب الأسود. وعلى الرغم من أننا ينبغي أن نضع في اعتبارنا أنه لا توجد وسيلة للتحقق مما إذا كانت هذه التوقعات صحيحة، فإنها ما زالت قادرة على تقديم نتائج مثيرة للاهتمام قد تدلنا

على أفكار أخرى **يمكن** اختبارها[١]. وبعد هذا التنبيه، دعونا نعود إلى النواة النجمية المنهارة التي تشكل الثقب الأسود.

وحيث إنه لا يوجد شيء يمكنه أن يوقف سحق الجاذبية في هذه النواة المنهارة، فإنه يبدو منطقيًا الاستنتاج بأنها تستمر في التقلص حتى تصبح نقطة صغيرة وكثيفة بلا حدود تُعرف باسم **التفرد**. وبعبارة أخرى، فإن كل الكتلة الأصلية للجسم التي أصبحت ثقبًا أسود ينبغي أن تنضغط إلى كثافة لا نهائية في التفرد، وهو موضع يصبح فيه الزمكان منحنيًا بصورة لا نهائية. وبالمثل، فعلى الأقل من وجهة نظر زميلك الذي اندفع إلى داخل الثقب الأسود في رحلتك، فإنه سيسقط سريعًا إلى التفرد، حيث ينسحق هو أيضًا في كثافة لا نهائية.

ولسوء الحظ، فإنه في حين أن فكرة الكثافة اللانهائية للتفرد تبدو معقولة طبقًا للنسبية العامة، فإنها ليست معقولة بهذا القدر وفقًا لنظرية أخرى ناجحة تمامًا في الفيزياء: نظرية **ميكانيكا الكم** ***quantum mechanics***، التي تشرح طبيعة الذرات والجسيمات دون الذرية. ودون الخوض في الكثير من التفاصيل، فإننا نستطيع أن نقول إن المشكلة الرئيسية هي هكذا: ميكانيكا الكم تتضمن **مبدأ عدم اليقين** ***uncertainty principle*** الشهير، الذي يخبرنا أننا لا نستطيع أن نعرف موقع الجسم أو حركته بيقين تام. ونتيجة لذلك، فإن ميكانيكا الكم في جوهرها تخبرنا بأن التفرد ينبغي أن يكون نقطة في الزمكان سوف تتذبذب على نحو فوضوي، وذلك ليس هو الشيء نفسه بالنسبة لكونها نقطة انحناء لا نهائية زمكانية.

---

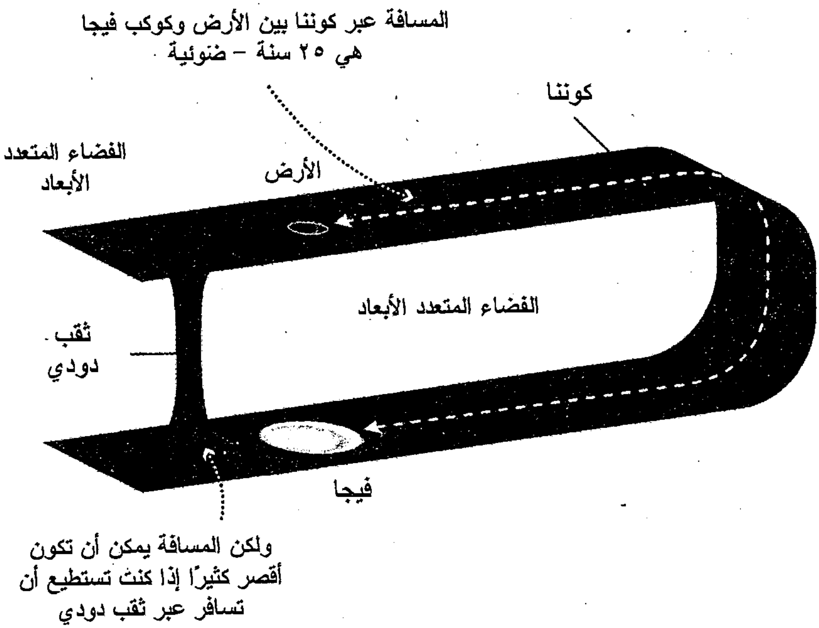
(١) هذه الفكرة ليست مختلفة تمامًا عن الطريقة التي ندرس بها المواضيع الأخرى. فعلى سبيل المثال فإننا لا نستطيع مباشرة أن نأخذ عينة من نواة الأرض أو من باطن الشمس، ولكننا واثقون من فهمهما لأننا نستطيع حساب خواصهما بغية توضيح الملاحظات التي نقوم بها خارجهما.

وتعني حقيقة أن النسبية العامة وميكانيكا الكم تعطيان إجابتين مختلفتين حول طبيعة التفرد، أن هاتين الإجابتين لا يمكن أن تكون كلتاهما صحيحتين. ونحن لذلك قد نكون في مرحلة الإعداد لمواجهة حدود معرفتنا العلمية الراهنة. وفي حين أن ذلك قد يكون مؤسفًا إذا كنت ترغب حاليًا في فهم التفرد، فإنه مثير علميًا للغاية. والموقف في جوهره يماثل الحالة التي كانت تواجه العلماء عندما لم توفر المعادلات الكهرومغناطيسية إطارًا مرجعيًا لسرعة الضوء، أو عندما كان مدار عطارد لا يتطابق تمامًا مع توقعات قوانين نيوتن. ومثلما ساعدت تلك المشاكل في تصدر أينشتاين لاكتشاف نظريتيه الخاصة والعامة للنسبية، فإن العلماء متفائلون بأن مشكلة التفرد سترشدنا في نهاية المطاف إلى نظرية جديدة وأفضل للطبيعة، نظرية سوف تحل محل كل من النسبية العامة ونظرية الكم بالطريقة نفسها التي حلت بها هذه النظريات محل النظريات السابقة حول الجاذبية والذرة.

الفضاء المتعدد الأبعاد والثقوب الدودية والسفر بمحرك الاعوجاج

وحقيقة أننا لا نستطيع أن نرى ما بداخل الثقب الأسود جعلته مرتعًا خصبًا لقصص الخيال العلمي. وعلى سبيل المثال، ناقشنا في فصل ١ فكرة أن الثقوب السوداء ربما تمدنا بممر بين جزء للكون وآخر. وينبغي أن يكون ممكنًا الآن أن نرى من أين جاءت هذه الفكرة. إذا تصورت قطعة من الكون بوصفها لوحًا مطاطيًا مقوسًا، والثقوب السوداء بوصفها "آبارًا" في اللوح المطاطي، فربما تتخيل أن ثقبين أسودين يمكن أن يصلا بين جهتيه عن طريق مكان ما في الفضاء المتعدد الأبعاد، وهذا يعني الأماكن التي تقع خارج زمكاننا العادي الرباعي الأبعاد. وهذه هي الفكرة الأساسية وراء **الثقوب الدودية** (شكل ٧–٤)، وذلك على الرغم من أن الحسابات الرياضية لمعادلات أينشتاين تشير إلى أنها لا تربط بالفعل ثقبين أسودين. ولسوء الحظ، على الرغم من أن الرياضيين يقترحون أن الثقوب الدودية

ينبغي بالفعل أن تكون موجودة، فإنهم يشيرون أيضًا إلى أنها ستكون غير مستقرة وستتقلص في الحال عندما تحاول أن تتنقل عبرها.



شكل (٤-٧)

سطح اللوح المطاطي في هذا المخطط يمثل الفضاء بين الأرض وكوكب فيجا. المسافة عبر الفضاء من الأرض إلى فيجا هي ٢٥ سنة-ضوئية، ولكن ثقبًا دوديًا ربما من الجائز أن يوفر مسارًا أقصر من ذلك بكثير. مقتبس من رسم توضيحي من:

Kip Thorne in his book Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy (Norton, 1994).

ومع ذلك، فقد تحرى بعض الفيزيائيين (لا سيما كيب ثورن من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا *([Caltech])* السبل الممكنة للالتفاف حول مشكلة عدم

الثبات، متخيلين طرقًا قد تستخدم فيها حضارة متقدمة الثقوب الدودية لإنشاء نظام أنفاق بين النجوم. وحتى الآن، لا يبدو أن أيًا من هذه الحلول قابل للتطبيق، ولكن لا يمكننا أن نستبعد تمامًا السفر عبر الثقوب الدودية. وهذا هو السبب في أن الثقوب الدودية تحظى بشعبية كبيرة في قصص الخيال العلمي، ولذلك استخدم كارل ساجان شبكة أنفاق الثقوب الدودية في روايته الرائعة **اتصال**، التي تحولت لاحقًا إلى فيلم يحمل الاسم نفسه.

وتعزيزًا لفكرة الأنفاق عبر الفضاء متعدد الأبعاد، فإنك تستطيع على الأرجح رؤية طرق أخرى يبدو فيها أن النسبية العامة قد تسمح بالسفر أسرع- من- الضوء من مكان في الكون إلى آخر. وعلى سبيل المثال، فإن كتّاب سلسلة أفلام **حرب النجوم** تخيلوا أنك قد "تقفز" ببساطة إلى الفضاء المتعدد الأبعاد، وتترك عمليًا كوننا، ثم تقفز عائدًا إلى أي مكان تختاره. واختلق الكتّاب في **جولة بين النجوم**، محرك الاعوجاج، الذي يُفترض أنه آلية تثني أو تطوي الزمكان لجلب النقاط البعيدة إلى الاتصال في الفضاء المتعدد الأبعاد، مما يسمح لك بالانتقال بسرعة فيما بينها. لاحظ أنه ليست هناك أية فكرة من هذه الأفكار تنتهك قوانين النسبية الخاصة حول عدم إمكانية الانتقال بسرعة أسرع من سرعة الضوء، لأن ذلك المنع ينطبق فقط على السفر **عبر** الفضاء العادي. وإذا تركت الكون لتسافر عبر الفضاء المتعدد الأبعاد، فإن ذلك المنع لن تحتاج إلى تطبيقه.

وهذه كلها أفكار ممتعة عند التفكير فيها، وفي الوقت الراهن، فإن قوانين الفيزياء المعروفة لا تستبعد أيًا من هذه الأشكال الغريبة من الانتقال. ولكن إذا كان أي منها ممكنًا من ناحية المبدأ، فإن استخدامه الفعلي للسفر يظل بعيدًا بكثير عن أي تكنولوجيا يمكن أن نتصورها. وبعد كل شيء، فليس من الواضح تمامًا كيف تتطرق إلى القفز داخل وخارج الكون لتعبر من خلال الفضاء المتعدد الأبعاد،

وإيجاد طريقة لتشويه الزمكان بدرجة أكبر مما هو مشوه طبيعيًا بسبب الجاذبية يبدو إلى حد ما تحديًا هندسيًا كبيرًا. وبالإضافة إلى ذلك، أعرب العديد من العلماء عن اعتراض آخر على هذه الأفكار: بسبب الطريقة التي يتشابك بها الزمان والمكان في الزمكان، فإن كل هذه الطرق المحتملة للسفر يبدو أنها تسمح بالسفر عبر الزمان كما تسمح به عبر الفضاء. وكل هذه المفارقات المعروفة جيدًا للسفر عبر الزمان مثل السفر إلى الماضي ومنع أبويك من الالتقاء، تجعل العديد من الفيزيائيين يشكون في أن السفر عبر الزمان ممكنًا. وعلى حد قول ستيفن هوكينج، ينبغي حظر السفر عبر الزمان "للحفاظ على العالم آمنًا للمؤرخين".

ومع ذلك فخلاصة القول؛ إننا لا نستبعد السفر عبر الزمان أو السفر من خلال الفضاء المتعدد الأبعاد بنفس الثقة التي يمكننا أن نستبعد بها إمكانية السفر بسرعة تتجاوز سرعة الضوء في الفضاء العادي. وحتى يمكننا التعرف على خلاف ذلك، فإن العالم ما زال آمنًا لكتاب الخيال العلمي الذين يختارون بعناية أساليبهم للسفر، ويتجنبون أي تضارب مع النسبية والقوانين الأخرى المعروفة للطبيعة.

الثقوب السوداء لا تبتلع

وصلنا الآن إلى دائرة كاملة في رحلة خيالية إلى ثقب أسود، بدأناها في فصل ١. وهكذا ونحن نختتم مناقشتنا للثقوب السوداء، دعونا نعود خطوة إلى الوراء ونلخص أهم الدروس التي قد تعلمناها حول ما هي، وكيف تؤثر على الأجسام التي حولها، وماذا يحدث للأجسام التي تقع فيها.

ما هي: تقول لنا النظرية العامة لأينشتاين أن ما نراه من الجاذبية ينبثق في الواقع من انحناء الزمكان، وأن هذا الانحناء تتسبب فيه الكتل. والثقوب السوداء هي كتل تقلصت إلى مثل ذلك الحجم الصغير التي هي عليه، وقد خلقت ثقوبًا في

الكون المرئي. وبمجرد أن يقع جسم في ثقب أسود، فإن الكون الخارجي يفقد كل اتصال معه.

ماذا يحدث للأجسام التي تدور حولها: جاذبية الثقب الأسود لا تختلف عن جاذبية أي جسم آخر له نفس الكتلة، فيما عدا أنها تصبح أشد للغاية- بمعنى انحناء أكبر في الزمكان- عند الاقتراب كثيرًا من الثقب الأسود. وعلى بعد مسافة منه، فإنك ستدور حول الثقب الأسود مثلما تفعل مع أي كتلة كبيرة أخرى. إنه لن يبتلعك إلى داخله.

ماذا يحدث للأجسام التي تقع فيها: أولاً، من الصعب الوقوع في ثقب أسود عن طريق المصادفة، لأن الثقوب السوداء مضغوطة جدًا في الحجم لدرجة أنك تحتاج تقريبًا إلى أن تهدف إلى الاصطدام بأحدها بدقة من على بعد. والشيء الوحيد الذي يسقط في الثقب الأسود بصورة سهلة وطبيعية هو الغاز الذي يكون على مقربة منه، ويحدث هذا لأن دوامات الغاز تخلق احتكاكًا من الممكن أن يتسبب في تحلل جزيئات الغاز حتى تسقط داخل الثقب الأسود. وإذا شاهدت شيئًا ما يسقط إلى داخل ثقب أسود، من الخارج فسوف تلاحظ أن وقته في طريقه إلى التوقف كلما اقترب من أفق الحدث. وفي الوقت نفسه، سترى أيضًا أن الضوء يصبح بصورة لا نهائية منزاحًا إلى اللون الأحمر، والذي يعني أنه سوف يختفي عن ناظريك. ويفسر الانزياح إلى اللون الأحمر السبب في أن المادة التي تسقط إلى داخل ثقب أسود سوف تختفي بالفعل عن نظرنا بسرعة نسبية، وأنك لن تراها أبدًا عندما تعبر أفق الحدث.

ومع ذلك الملخص الذي تركناه وراءنا، فإنني أود أن ينتهي هذا الفصل بملاحظة شخصية حول ما تدلنا عليه الثقوب حول طبيعة العلم. لقد سمعت كثيرًا من غير العلماء يقولون إن العلم محدود بطريقة ما أو بأخرى، وإن العلماء

مرتابون جدًا، لدرجة أنهم منغلقو العقول بالنسبة للأفكار الجديدة. وتمدنا قصة الثقوب السوداء بحجة قوية مضادة. قبل أينشتاين، فإن أي شخص يعلن عن إمكانية وجود ثقوب في الكون محدودة بآفاق حدث حيث يمضي الزمن إلى التوقف وينزاح الضوء لا نهائيًا إلى اللون الأحمر، فقد كان من المحتمل اعتباره مجنونًا. وحتى بعد أن استخدم شفارتزشيلد معادلات أينشتاين ليوضح أنها تسمح بوجود ما نسميه الآن ثقوبًا سوداء، فإن كل العلماء تقريبًا افترضوا بأنه من الغريب جدًا أن تكون حقيقية. وحديثًا وحتى الستينيات، فإن أي استفتاء للعلماء قد اكتشف أن معظمهم يفترض أن قانونًا لم يتم اكتشافه للطبيعة سوف يؤكد أن مثل تلك الأجسام الغريبة لا يمكن وجودها في الحقيقة. واليوم، انعكس هذا الوضع تمامًا، ومن الصعب أن تجد أي فيزيائي أو فلكي يشك في حقيقة وشيوع الثقوب السوداء في الكون.

هذا التغير الدراماتيكي في وجهة النظر هو نتيجة مباشرة لطبيعة العلم المبنية على الأدلة. وبغض النظر عن الغرابة التي قد تبدو عليها أية فكرة في البداية، فإنه إذا كانت الأدلة عليها قوية بشكل كاف، فإن العلماء في نهاية المطاف سيقبلونها. وهذا هو السبب في أن تعريفي المفضل عن العلم هو أنه **وسيلة لاستخدام الأدلة لمساعدتنا في التوصل إلى اتفاق**. ومهما كانت الفكرة الجديدة مثيرة للجدل الذي يأتي معها – سواء أكانت فكرة أن الأرض تدور حول الشمس، أو أن الحياة تتطور عبر الزمن، أو أن الجاذبية تنشأ من انحناء الزمكان– فإن العلم يوفر الوسائل **الوحيدة** التي يمكن بها أن نصل إلى اتفاق حول ما إذا كانت الفكرة صحيحة أو في طريقها إلى مزبلة التاريخ.

(٨)

الكون المتمدد

تبدو مفاهيم أينشتاين ثورية جدًا وحديثة، لدرجة أنه من السهل أن ننسى أنه اكتشفها في وقت كان فيه كثير من رصيدنا في فهم الكون مازال محدودًا جدًا. وعلى سبيل المثال، كما ناقشنا في فصل ٧، في حين أن النسبية العامة أجازت وجود الثقوب السوداء فإن عددًا قليلا من الناس اعتقد بأنها قد تكون موجودة حقًا حتى بضعة عقود لاحقة. وبالمثل، فعلى الرغم من أن المعادلة $E = mc^2$ أشارت بأن النجوم يمكنها من حيث المبدأ أن تكون مشرقة بتحويل جزء صغير من كتلتها إلى طاقة، فإن آلية الاندماج النووي لم تُكتشف حتى مرت أكثر من ٣٠ سنة على وضع أينشتاين هذه المعادلة في نظريته عن النسبية الخاصة.

ولعل ما هو أكثر غرابة للناس اليوم، أن المفهوم البشري عن الكون كان مختلفًا تمامًا عندما أتم أينشتاين عمله في النسبية. وحاليًا، يمكن لأطفال المدرسة الابتدائية أن يقولوا لك إن مجرة درب التبانة هي المجرة التي نعيش فيها، وإنها مجرد واحدة من العديد من المجرات العظيمة في الكون. ولكن عندما نُشرت النسبية العامة في عام ١٩١٥، فإن علماء الفلك كانوا ما زالوا يتجادلون بنشاط عما إذا كانت تُوجد مجرات منفصلة[1]. وعديد منهم (وربما معظمهم) يدعمون جانب

(١) فاجأت هذه الحقيقة الكثير من الناس، بما أننا نستطيع اليوم بسهولة أن نصور المجرات الأخرى بالتلسكوبات، ولكن تلسكوبات ذلك الزمن لم تكن قوية بما يكفي لنرى مكان المجرات إلا بقعًا ضبابية إلى حد ما من الضوء، ولذلك فلم يكن واضحًا إذا كانت هذه البقع سحبًا من الغاز داخل مجرة درب التبانة أو مجموعات منفصلة من النجوم.

أن مجرة درب التبانة تمثل الكون كله. ونظرًا لأننا نعرف الآن أن الكون المرئي يحتوي على نحو ١٠٠ بليون مجرة، فإن هذا يعني بأنهم كانوا يعتقدون عن الكون في عام ١٩١٥ بأنه أصغر ١٠٠ بليون مرة (في عدد المجرات) مما نعرف اليوم.

وبعد هذه الخلفية التاريخية، ننتقل الآن إلى موضوعنا النهائي لهذا الكتاب: التنبؤ الذي قامت به النسبية العامة والذي بدا لا يصدق حتى أن أينشتاين نفسه في ذلك الوقت لم يصدقه. وكما سنرى، فعلى الرغم من خطأ أينشتاين في عدم تصديق نظريته، فإنه قد أتى بفكرة ربما يثبت الآن مدى أهميتها في فهمنا للكون.

غلطة أينشتاين الكبرى

بعد وقت قصير من نشر أينشتاين نظرية النسبية العامة، كان يعمل على معادلاتها عندما أدرك أن لها نتيجة مثيرة للقلق إلى حد ما: لأن كل مادة تجذب جميع المواد الأخرى من خلال الجاذبية، فإن معادلاته أشارت بأن الكون لا يمكن أن يكون مستقرًا. أي أنه، عندما حاول أن يفترض كونًا استقرت فيه جميع الأجسام في أماكنها، فإنه وجد أن الجاذبية سوف تجذبها جميعها معًا، مسببة تقلص الكون. وبدا أن نظريته من حيث الجوهر، تتنبأ بأن الكون ينبغي أن يكون قد تقلص منذ زمن طويل داخل ثقبه الخاص الأسود.

ومع إدراكنا وفهمنا الحالي، نستطيع أن نرى أن هناك على الأقل طريقتين للتوفيق بين النسبية العامة والكون الذي لم يتقلص من الوجود. الأول أن نفترض أن النسبية العامة صحيحة كما هي عليه، وأن الكون لم ينهر لأنه آخذ في التمدد. وبعبارة أخرى، إذا افترضنا أننا نعيش في كون متمدد، فإن التمدد عندئذ سيعادل ميل الجاذبية إلى جعل الكون يتقلص. والطريقة الثانية للتوافق بين النظرية والحقيقة هي أن نفترض أن المعادلات تفتقد معاملا ما سوف يوازن قوة الجذب

الشاملة للجاذبية. وفي تلك الحالة، قد نحاول أن "نصلح" النسبية العامة بإضافة معامل ما جديد إلى المعادلات والذي سيتوافق مع أن الكون ما زال متماسكًا.

ولكن أينشتاين بالطبع، لم يكن لديه الفرصة للاستفادة من نظرتنا المتأخرة. وبالإضافة إلى ذلك، ولأسباب غير واضحة تمامًا، اعتقد أينشتاين أن الكون ينبغي أن يكون ثابتًا وخالدًا. ولذلك، فإن الطريق الثاني للتوفيق بين نظريته والواقع بدا مفتوحًا أمامه، فاختار ذلك الطريق. وفي الحقيقة، أنه أضاف عاملا تصحيحيًا لمعادلات النسبية العامة لغرض وحيد هو موازنة القوة الطبيعة الساحبة للجاذبية، وبذلك سيتوافق الكون مع مفهومه الشخصي. وظهر هذا العامل التصحيحي كمعامل وحيد في المعادلات، وسماه أينشتاين **الثابت الكوني** ***cosmological constant***.

قدم أينشتاين الثابت الكوني للعالم في ورقة نشرها في عام ١٩١٧. وحتى في ذلك الوقت، فقد تراءى له في الغالب أن يعتذر عن إضافة هذا العامل، معترفًا بعدم وجود مبرر له يستند إلى الأدلة وأنه عدا ذلك عقّد الهيكل البسيط لمعادلاته. واعترف أيضًا بأن معادلاته قد كانت على ما يرام على ما هي عليه، لو لم يكن مصرًا على جعل الكون ثابتًا وأزليًا.

أطلق أينشتاين لاحقًا على تقديمه للثابت الكوني بأنه "أكبر خطأ" في مسيرته. ولأن التعليق جاء لنا مستعملا (من سيرة ذاتية للفيزيائي جورج جاموف) فنحن لا نعرف بالضبط لماذا قام أينشتاين بذلك، ولكن يمكننا أن نقدم تخمينًا معقولا. كان لأينشتاين العديد من المعتقدات الراسخة، ولكنه أيضًا كان مزهوًا بنفسه لإخلاصه للأساليب العلمية المبنية على الأدلة. وعلى سبيل المثال، في حالة النسبية العامة، فإنه أطلق على فكرته الرئيسية (مبدأ التكافؤ) "أسعد فكرة"، واعتبر نجاح نظريته لاحقًا في تفسير الانحراف في مدار عطارد قمة مسيرته العلمية. واتضح أن تقديم الثابت الكوني هو حالة نادرة في مسيرة أينشتاين التي قام فيها بتعديل النظرية

لتتناسب مع فكرته المسبقة حول الكون دون النظر إلى البرهان الذي يؤكدها. وفي هذا السياق، فإنه ربما قد أدرك أن الثابت الكوني يعتبر "غلطته الكبرى" ليس فقط لأنه منعه من التنبؤ بتمدد الكون، ولكن ربما أيضًا لأنه سمح لنفسه أن تضل عن إخلاصها لمبادئ العلم.

التمدد المكتشف

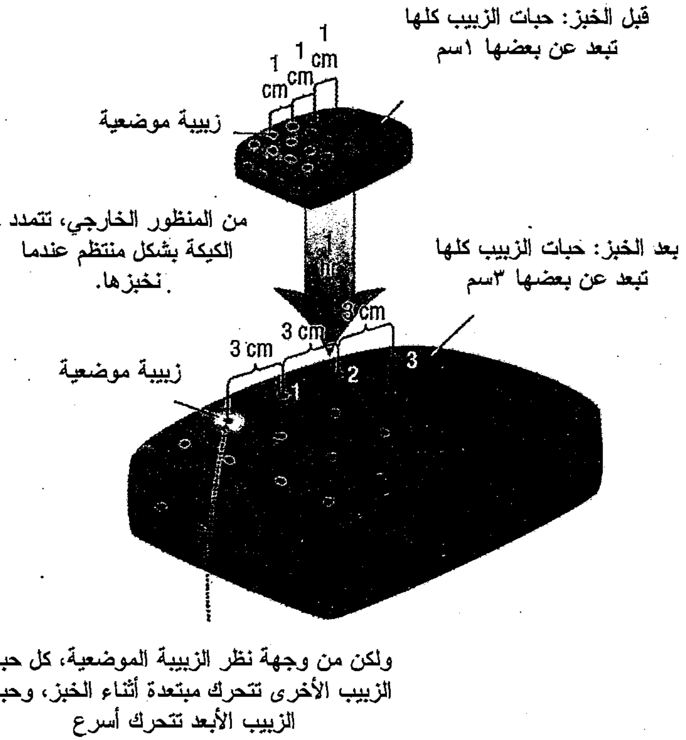
إذا نحينا جانبًا ثابت أينشتاين الكوني، بقينا مع حقيقة بارزة: لأن الكون بوضوح لم يتقلص، فإن النظرية العامة للنسبية **تتنبأ** فعليًا بأن الكون ينبغي أن يتمدد. وهذا التنبؤ تم التحقق منه بمعرفة إدوين هابل بعد وقت يزيد قليلا عن عقد من الزمان من نشر أينشتاين النسبية العامة[١]. ومنذ ذلك الحين، تم التحقق منه عن طريق الكثير جدًا من الملاحظات إلى حد أننا نعتبر الآن تمدد الكون بوصفه حقيقة ثابتة.

وكان اكتشاف هابل لتمدد الكون حصاد عقد من الملاحظات الدقيقة منه ومن آخرين، ولكنه في الحقيقة كان يتألف من جزأين رئيسيين. أولاً، أثبت وجود مجرات خارج مجرة درب التبانة. وقد فعل هذا بالاستعانة بتلسكوب جديد قوي، مكنه أن يرى النجوم المنفردة وعناقيد النجوم في المجرات القريبة نسبيًا. وعندما قام بذلك، فإنه استطاع أن يقدر المسافات بين المجرات وكانت هذه المسافات شاسعة جدًا بحيث اتفق الجميع على أن المجرات ينبغي، وأنها تكمن خارج مجرة درب التبانة. ثم بعد ذلك، بدأ القيام بتقدير للمسافات للعديد من المجرات، بينما كان

(١) نشر قسيس وعالم بلجيكي اسمه جورج لوميتر بالفعل ورقة حول تمدد الكون قبل أن ينشر هابل كتابه بعامين. ويرى بعض المؤرخين أن لوميتر ينبغي منحه حق الاكتشاف. ومع ذلك، فربما لم يكن هابل على علم بورقة لوميتر، والتي نُشرت بالفرنسية، ويشير عمل تنقيبي معاصر لماريو ليفيو من معهد تلسكوب هابل الفضائي العلمي إلى أن لوميتر نفسه لم يفترض أنه يستحق حق الاكتشاف.

يقيس أيضًا السرعة (بالبحث عن الانزياح في خطوط الطيف) التي تتحرك بها المجرات في اتجاه الأرض أو بعيدًا عنها. واكتشف أنه باستثناء بعض المجرات القريبة جدًا من الأرض، فإن كل المجرات الأخرى تتحرك بعيدًا عنا، وكلما كانت المجرات أبعد، كلما تحركت بسرعة أكبر.

يمكنك أن تفهم كيف أدت تلك الملاحظات إلى استنتاج أننا نعيش في كون متمدد بالتفكير في كيكة زبيب مخبوزة في فرن (شكل ٨-١). تخيل أنك قمت بعمل كيكة زبيب والتي وضعت فيها الزبيب بدقة بحيث أن المسافة بين حبات الزبيب المتجاورة هي دائمًا ١ سم. ووضعت الكيكة في الفرن وعلى مدى الساعة التالية تمددت حتى زادت المسافة بين حبات الزبيب المتجاورة إلى ٣ سم. وحقيقة أن الكيكة قد تمددت في الحجم من الخارج ستكون واضحة تمامًا عندما تنظر إليها. ولكن ما الذي سوف تراه إذا كنت تعيش **داخل** الكيكة، مثلما نعيش نحن داخل الكون؟



رقم حبة الزبيب	المسافة قبل الخبز	المسافة بعد الخبز (بعد ساعة واحدة)	السرعة
١	١ سم	٣ سم	٢ سم/ ساعة
٢	٢ سم	٦ سم	٤ سم/ ساعة
٣	٣ سم	٩ سم	٦ سم/ ساعة

شكل ٨-١

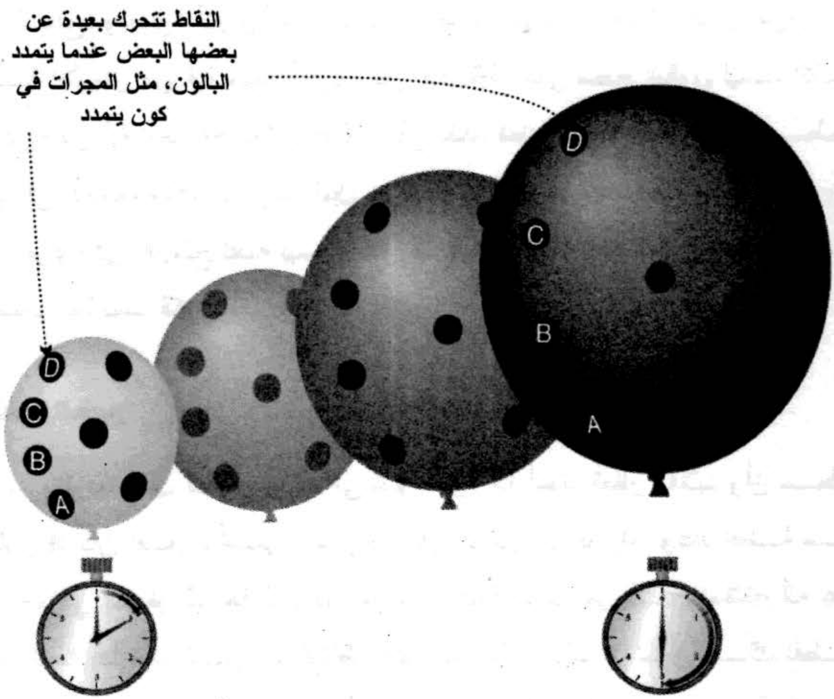
إذا كنت تعيش في إحدى حبات الزبيب داخل كيكة زبيب تتمدد، فإنك ستلاحظ أن جميع حبات الزبيب الأخرى تتحرك مبتعدة عنك، وحبات الزبيب الأبعد تتحرك بسرعة أكبر. وبالمثل، تتضمن حقيقة أننا نلاحظ أن المجرات الأبعد تتحرك مبتعدة عنا بسرعات أعلى، أننا نعيش في كون متمدد.

للإجابة عن هذا السؤال، يمكننا اختيار أي حبة زبيب (لا يهم أيـة واحـدة) واعتبارها "حبة زبيب موضعية". ويوضح (شكل ٨-١) أحـد الخيـارات الممكنـة لحبة زبيب موضعية، مع العديد من حبات الزبيب الأخرى المرقمة المجاورة لهـا، قبل وبعد الخبز. ويلخص الجدول المرفق ما ستشاهده إذا كنت تعيش داخـل حبـة الزبيب الموضعية. لاحظ، على سبيل المثال، ان حبة الزبيب رقـم ١ بـدأت عنـد مسافة ١ سنتيمتر قبل الخبز وانتقلت إلى مسافة ٣ سنتيمترات بعد الخبز، مما يعني أنها تحركت مسافة ٢ سنتيمتر بعيدًا عن حبة الزبيب الموضعية خلال سـاعة مـن الخبز. إذن، فسرعتها كما تُرى من حبة الزبيب الموضعية هـي ٢ سـنتيمتر فـي الساعة. حبة الزبيب رقم ٢ تحركت من مسافة ٢ سنتيمتر قبل الخبز إلى مـسافة ٦ سنتيمترات بعد الخبز، مما يعني أنها انتقلت مسافةِ ٤ سنتيمترات بعيدًا عـن حبـة الزبيب الموضعية خلال ساعة. ومن ثم، فسرعتها هي ٤ سنتيمترات في الـساعة، أو سرعتها ضعف سرعة حبة الزبيب رقم ١. وكما يبين الجـدول، يـستمر هـذا النمط، بحيث إنك ترى كل حبات الزبيب الأخرى تتحرك عن موقعـك فـي حبـة الزبيب الموضعية وحبات الزبيب الأبعد تتحرك بعيدًا عنك بسرعة أكبر. هذا هـو تمامًا ما لاحظه هابل بالنسبة للمجرات، وهو ما يتيح لنا أن نستنتج أننا نعيش فـي كون متمدد.

والمشكلة الرئيسية بالنسبة للتشبيه بكيكة الزبيب هي أن تلك الكيكة هي جسم ثلاثي الأبعاد يتمركز داخل فضاء أكبر ثلاثي الأبعاد. ويعني هذا أننا نرى المركـز والحواف عندما ننظر إلى الكيكة من الخارج، وأنها تتمدد داخـل فـضاء موجـود مسبقًا. ووفقًا للنسبية العامة، فإن بنية الكون **محددة** بالكتل الموجودة داخله، والـذي يعني أننا لا نستطيع أن نفكر في الفضاء أو في الزمكان بشكل مستقل عن الكـون. ويعني هذا، من الناحية العملية، أن الكون ليس له مركز أو حواف، وأنه لا يتمـدد

داخل فضاء موجود مسبقًا. وبالأحرى، فإن الفضاء الموجود بين المجـرات يتـسع أساسًا كلما تمدد الكون.

وتجعل هذه الحقيقة حتمًا الناس تتساءل عن الكيفية التي يستطيع بها الكـون أن يتوسع دون التوسع **داخل** شيء. وكما جرت العادة، فإن أملنا الوحيد لتـصورها هو بمثال ثنائي الأبعاد. وفي هذه الحالة، دعونا نتخيل أن الكـون بوصـفه **سـطح** بالون يتمدد؛ مثل سطح الأرض، وسطح البالون ثنائي الأبعـاد لأنـه لا يوجـد إلا اتجاهان مستقلان للحركة المحتملة عليه (مثل شمال-جنوب وشرق-غرب). نحـن نستخدم إذن سطحًا ثنائي الأبعاد لنمثل كل الأبعاد الثلاثة للفضاء، مما يعني في هذا المثال، أن المناطق داخل سطح البالون وخارجه **ليست جزءًا من عالمنا**.



شكل (٢-٨)

يوفر لنا سطح بالون يتمدد تشبيهًا جيدًا لتمدد كوننا. لاحظ أن السطح فقط يمثل الكون؛ والمناطق داخل البالون وخارجه ليست جزءًا من الكون في هذا التشبيه.

ويوضح شكل (٨-٢) نقاطًا، تمثل المجرات، على سطح بالون يتمدد. وكما في كيكة الزبيب، يمكنك اختيار أية نقطة لتكون نقطتك الموضعية الخاصة بك، وسترى أن كل النقاط الأخرى تتحرك مبتعدة عنك كلما تمدد البالون، والنقاط الأبعد تتحرك بعيدًا عنك بسرعة أكبر. وهذه المرة، يطابق التشبيه، على أية حال، الملامح الرئيسية للكون الحقيقي. ومثل سطح الأرض، فإن سطح البالون ليس له مركز ولا حواف. (بالطبع، يوجد مركز داخل البالون، ولكن الداخل ليس جزءًا

من السطح؛ وبعبارة أخرى، مثلما تماماً أن مدينة نيويورك ليست أكثر مركزية بالنسبة للأرض من أية مدينة أخرى، فإن أية نقطة على سطح البالون ليست أكثر مركزية من أية نقطة أخرى). وعلاوة على ذلك، فعندما يتمدد البالون، فإن سطحه يزيد في الحجم، ولكنه لا يزيد داخل جزء موجود بصورة مسبقة من البالون. وبالأحرى، فإن السطح نفسه ببساطة هو الذي يتسع كلما تمدد البالون، مثلما يتسع الفضاء كلما تمدد الكون.

الانفجار الكبير

ويقودنا مثال البالون أيضاً إلى تنبؤ آخر. إذا أعدنا النظر، فلابد وأن سطح البالون قد كان أصغر وأصغر كلما رجعنا في الزمن إلى الوراء. وعند نقطة ما، كان متناهي الصغر لدرجة لا يمكن أن يكون فيها أصغر من ذلك. ونستنتج أنه عند هذه النقطة بدأ تمدد البالون، وبالتناظر فإننا نتنبأ بأنه ولابد أن تكون هناك نقطة بداية مشابهة لتمدد الكون. وبعبارة أخرى، فإن حقيقة أن الكون يتمدد تقودنا إلى أن نتوقع بأن الكون لابد وأنه قد نشأ في لحظة معينة في الماضي، وهي اللحظة التي بدأ فيها في التمدد. ونحن نسمي تلك اللحظة **الانفجار الكبير**. وبمعرفة مدى سرعة تمدد الكون، يمكننا بإرجاع التمدد إلى الوراء تقدير وقت حدوث الانفجار الكبير. ويقترح أفضل تقدير معاصر لعمر الكون بأنه أقل قليلا من ١٤ بليون سنة. (وبمزيد من الدقة، فإن بيانات صادرة عن مهمة **بلانك *Planck*** لوكالة الفضاء الأوربية تقدر أن عمر الكون هو نحو ١٣,٨ بليون سنة).

وقبل أن نستمر في مناقشة التمدد، أريد أن أركز باختصار على نقطتين محوريتين حول الانفجار الكبير. أولاً، كما يوضح تشبيهنا فإن الانفجار الكبير هو ببساطة اسم أطلقناه على بداية التمدد؛ إنه **ليس** انفجاراً أطلق مادة متطايرة في

فضاء موجود مسبقًا، لأنه لم يكن هناك فضاء مسبق. ثانيًا، أن فكرة الانفجار الكبير هي توقع منطقي ناتج عن الحقيقة المرئية للكون المتمدد، والذي هو بدوره تأكيد على تنبؤ النسبية العامة بأن الكون لا يمكن أن يظل ساكنًا. ومع ذلك، فمثل أي شيء في العلم، يظل التنبؤ تخمينًا حتى توجد الأدلة التي تدعمه. وفي حالة الانفجار الكبير، فإن العلماء قد وجدوا في الواقع أدلة قوية على حدوثه بالفعل.

وباختصار، توجد ثلاثة خطوط من الأدلة التي تدعم فكرة الانفجار الكبير. أولاً، تذكر لأن الضوء يستغرق وقتًا عندما ينتقل مسافة شاسعة خلال الفضاء، فإننا نرى الأجسام التي على مسافات كبيرة كما كانت عليه قبل زمن طويل. وعلى سبيل المثال، فعندما ننظر إلى مجرات تبعد عنا بـ ٧ بلايين سنة ضوئية[1]، فإننا نرى الضوء الذي سافر خلال الفضاء لمسافة ٧ بلايين سنة قبل أن يصل لنا، والذي يعني أننا نرى المجرات كما كانت تبدو عليه منذ ٧ بلايين سنة. وإذا كان هناك حقًا انفجار كبير من نحو ١٤ بليون سنة، فإن تلك المجرات (في المتوسط) لها فقط نصف عمر المجرات القريبة منا تقريبًا. والمجرات البعيدة يوضح شكلها في الواقع الدليل على كونها أصغر عمرًا من المجرات القريبة، مما يدعم فكرة الانفجار الكبير لأنها تتضمن أن للكون عمرًا متناهيًا.

والخط الرئيسي الثاني للبرهان على الانفجار الكبير يأتي من الملاحظات المتعلقة **بإشعاع الخلفية الميكروموجية الكونية** ***cosmic microwave background***،

---

(١) المسافات الكبيرة هي إلى حد ما غامضة في الكون المتمدد، حيث أن المجرات البعيدة اليوم ينبغي أن تكون أكثر بعدًا عما كانت عليه في الوقت الذي بدأ فيه الضوء القادم منها في الانتقال إلينا. وعندما أقول عن مسافة إنها ٧ بلايين سنة ضوئية، فإن ما أعنيه حقًا أن مجرة تقع على مسافة ما قد استغرق الضوء ٧ بلايين سنة ليصل منها إلينا، وحتى نتجنب هذا النوع من الغموض، فإن علماء الفلك كثيرًا ما يقولون إن المجرة واقعة ٧ بلايين سنة، "في الزمن الماضي"، لأننا نراها كما كانت عليه من ٧ بلايين سنة.

والذي يشير إلى الإشعاع الموجي الدقيق الذي قد كشفت التلسكوبات الخاصة أنه يأتي من جميع اتجاهات الفضاء. وحتى تفهم كيف أن هذا يدعم الانفجار الكبير، فكر فيما يحدث عندما تضغط الهواء: الضغط يجعل الهواء أكثر سخونة. وبنفس الطريقة تمامًا، تتنبأ نظرية الانفجار الكبير بأن الكون كان أكثر سخونة حينما كان عمره أقل، لأن أية قطعة من الكون كانت من حيث الجوهر مضغوطة في حجم أصغر. وينبعث الإشعاع دائمًا من الأجسام الساخنة، ولذا فإن الكون في بدايته كان مليئًا بالضوء الشديد في كل مكان. وعندما تمدد الكون وأصبح باردًا، فإن الفضاء المشدود لابد وأنه قد مطط تدريجيًا الأطوال الموجية لهذا الضوء. وأشارت الحسابات التي أجريت في الأربعينيات أنه **إذا** كان هناك انفجار كبير، فإن الكون اليوم ينبغي أن يكون مليئًا بإشعاع يتميز بارتفاع درجة حرارته عدة درجات فوق الصفر المطلق ***absolute zero***، مما يعني أنه سيكون قابلا للكشف عنه بوصفه إشعاعًا ميكروموجيًا. وتم الكشف عن إشعاع الخلفية الميكروموجية الكونية لأول مرة في بداية الستينيات، ودرجة حرارته تزيد ٣ درجات على الصفر المطلق، بالاتساق مع التنبؤ الذي قامت به نظرية الانفجار الكبير. وفي الحقيقة، فإن المزيد من التحليل التفصيلي لنظرية الانفجار الكبير يتنبأ بدقة بالخواص الطيفية لإشعاع الخلفية الميكروموجية الكونية والملاحظات تطابق هذه التوقعات بدقة رائعة.

والخط الثالث من الأدلة يأتي من التركيب الكيميائي الكلي الملاحظ للكون. يمكن استخدام نظرية الانفجار الكبير لحساب درجة حرارة وكثافة الكون في وقت مبكر، ويمكن استخدام هذه الظروف بدورها للتنبؤ بالتركيب الكيميائي للكون وقتها. وفي وقت مبكر جدًا، كان العنصر الوحيد هو الهيدروجين – الذي تكون نواته ببساطة بروتونًا مفردًا– لأن السخونة كانت شديدة جدًا بالنسبة للبروتونات والنيوترونات المنفردة المحتجزة معًا في نوى ذرية كبيرة. وعلى أية حال، وبعد

فترة قصيرة بشكل ملحوظ هي حوالي ٥ دقائق بعد الانفجار الكبير، فقد كان من المحتمل أن يحدث بعض الاندماج النووي، وتتوقع الحسابات أن التركيب الكيميائي للكون لا بد وأنه قد تحول ليصبح ٧٥% هيدروجين و٢٥% هيليوم (من الكتلة). وعلاوة على ذلك، باستثناء جزء صغير نسبيًا من المادة التي تحولت منذ انصهارها إلى عناصر أثقل بالنجوم، فإننا نتوقع أن الكون ما زال له نفس هذا التركيب الأساسي إلى اليوم – وتوضح الملاحظات أن الأمر كذلك. وبعبارة أخرى، تتوقع نظرية الانفجار الكبير التركيب الكيميائي الملحوظ للكون.

وباختصار، فإن فكرة الانفجار الكبير هي نتيجة طبيعية لـ"تنبؤ" النسبية العامة بتمدد الكون. ومع وجود ثلاثة خطوط قوية من الأدلة المؤيدة لفكرة الانفجار الكبير، فهناك على ما يبدو القليل من الشك العلمي في أن تمدد الكون قد بدأ فعلا منذ ١٤ بليون سنة تقريبًا.

هندسة الكون

مناقشتنا لتشبيه البالون قد تجعلك تتساءل عن "الشكل" العام للزمكان. ونحن نعلم أن الجاذبية تنشأ من انحناء الزمكان، ويمكن للزمكان أن يتخذ موضعيًا أشكالا عديدة مختلفة. ومع ذلك، يجب أن يكون للزمكان ككل بعض الانحناء العام الذي هو نتيجة التأثير لكل الكتل الموجودة في داخله. أي، أن أية كتلة منفردة داخل الكون تسبب بعض الانحناء الموضعي، وكل الانحناءات الموضعية سوف تجتمع في شكل ما كوني. والفكرة مماثلة للتي نرى بها الأرض: موضعيًا، سطح الأرض منحن بطرق عديدة مختلفة بالجبال والوديان والملامح الجغرافية الأخرى، ولكن كوكبنا كونيًا مستدير بشكل واضح.

وعندما نستخدم مثال البالون، فنحن نفترض بشكل أساسي أن جميع الانحناءات الموضعية تجتمع في نهاية المطاف لينتهي الانحناء على نفسه مثل

فترة قصيرة بشكل ملحوظ هي حوالي ٥ دقائق بعد الانفجار الكبير، فقد كان من المحتمل أن يحدث بعض الاندماج النووي، وتتوقع الحسابات أن التركيب الكيميائي للكون لا بد وأنه قد تحول ليصبح ٧٥% هيدروجين و٢٥% هيليوم (من الكتلة). وعلاوة على ذلك، باستثناء جزء صغير نسبيًا من المادة التي تحولت منذ انصهارها إلى عناصر أثقل بالنجوم، فإننا نتوقع أن الكون ما زال له نفس هذا التركيب الأساسي إلى اليوم – وتوضح الملاحظات أن الأمر كذلك. وبعبارة أخرى، تتوقع نظرية الانفجار الكبير التركيب الكيميائي الملحوظ للكون.

وباختصار، فإن فكرة الانفجار الكبير هي نتيجة طبيعية لـ"تنبؤ" النسبية العامة بتمدد الكون. ومع وجود ثلاثة خطوط قوية من الأدلة المؤيدة لفكرة الانفجار الكبير، فهناك على ما يبدو القليل من الشك العلمي في أن تمدد الكون قد بدأ فعلا منذ ١٤ بليون سنة تقريبًا.

هندسة الكون

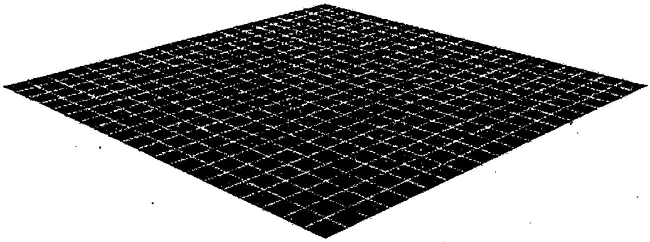
مناقشتنا لتشبيه البالون قد تجعلك تتساءل عن "الشكل" العام للزمكان. ونحن نعلم أن الجاذبية تنشأ من انحناء الزمكان، ويمكن للزمكان أن يتخذ موضعيًا أشكالا عديدة مختلفة. ومع ذلك، يجب أن يكون للزمكان ككل بعض الانحناء العام الذي هو نتيجة التأثير لكل الكتل الموجودة في داخله. أي، أن أية كتلة منفردة داخل الكون تسبب بعض الانحناء الموضعي، وكل الانحناءات الموضعية سوف تجتمع في شكل ما كوني. والفكرة مماثلة للتي نرى بها الأرض: موضعيًا، سطح الأرض منحنٍ بطرق عديدة مختلفة بالجبال والوديان والملامح الجغرافية الأخرى، ولكن كوكبنا كونيًا مستدير بشكل واضح.

وعندما نستخدم مثال البالون، فنحن نفترض بشكل أساسي أن جميع الانحناءات الموضعية تجتمع في نهاية المطاف لينتهي الانحناء على نفسه مثل

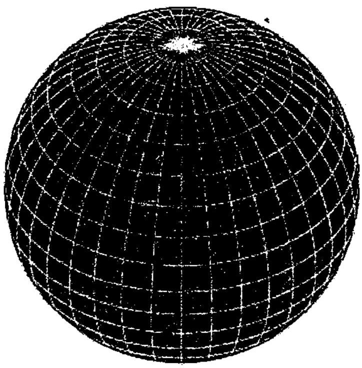
سطح الأرض. ومع ذلك، فليس هذا هو الاحتمال الوحيد. والاحتمال الثاني هو أن الشكل الكلي للزمكان يشبه بالأحرى شكل منصة كتانية مستوية، التي تكون متقلة فقط بالانخفاضات الموضعية للجاذبية. والاحتمال الثالث هو أنه بدلا من الانحناء ثانية على نفسه مثل الأرض أو البالون، فإن الزمكان ينتشر للخارج ويكون إلى حد ما مثل سطح السرج.

ويستخدم شكل (٨-٣) سطوحًا ثنائية الأبعاد ليوضح كل الأشكال الهندسية الثلاثة المحتملة. لاحظ أنك، حتى تتجنب أن يكون بالكون مركز أو حواف، فإنك ينبغي أن تتخيل الشكلين الهندسيين المستوي والذي على هيئة السرج يمتدان إلى ما لا نهاية؛ وشكل البالون هو فقط، الكروي الهندسي الذي له سطح محدود. ولاستكمال التصور، فإنك تحتاج أن تتخيل أن كل الأسطح الثلاثة تمتد لتمثل الكون المتمدد، وأن تتذكر كالعادة دائمًا أن هذه الأسطح هي فقط تشبيهات ثنائية الأبعاد لبنية الفضاء في زمكان رباعي الأبعاد.

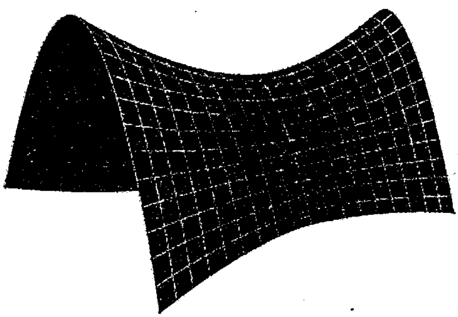
ولم تدلنا النسبية العامة أي من هذه الأشكال الهندسية الثلاثة المحتملة هو الذي يتخذه الكون بالفعل. ولنتعلم ذلك، فإننا يجب أن نقترب من هذه المسألة بطرق أخرى. وهناك نهجين رئيسيين. أحدهما أن نحاول تحديد الكثافة الكلية والمادة والطاقة في الكون. وينبغي أن يدلنا هذا على هندسة الكون، لأن الكثافة الأعلى تعني جاذبية أشد، ومن ثم انحناء أكبر، ولذلك يمكن أن نستخدم الكثافة لحساب الهندسة الكلية. وبدلا من ذلك، يمكننا أن ندرس الطريقة التي تغير بها معدل التمدد بمرور الزمن، لأن هذا من شأنه أيضًا أن يدلنا على القوة الشاملة للجاذبية ككل.



هندسة (حرجة) مستوية



هندسة (مغلقة) كروية



هندسة (مفتوحة) شكل السرج

شكل (٨ـ٣)

تشبيهات ثنائية الأبعاد للأشكال الهندسية الثلاثة المحتملة للكون

إذا فكرنا منطقيًا في ذلك، فإننا نتوقع أن الجاذبية سوف تبطئ تمدد الكون تدريجيًا مع مرور الوقت. وإذا كان الكون يحتوي على ما يكفي من الكتلة – وبالتالي ما يكفي من الجاذبية– فعندئذ فإن التمدد سوف ينتهي به المطاف إلى أن يتوقف ثم ينعكس. في تلك الحالة، فإن الكون ربما ينتهي في يوم ما إلى "انهيار كبير". وإذا كان الكون يحتوي على كتلة كلية قليلة نوعًا ما، فإننا عندئذ نتوقع أن الجاذبية ستبطئ التمدد تدريجيًا، ولكنها لن تستطيع أبدًا أن تبطئه بما يكفي لوقف التمدد وانعكاسه. وسيتلاشى الكون تمامًا مع مرور الوقت، بينما تحترق النجوم في نهاية المطاف وتصبح المجرات مظلمة.

وتوحي هذه الأفكار بطريقة بسيطة لتحديد أي من هذه الاحتمالات سيكون صحيحًا: وهي قياس كيفية تغير معدل التمدد مع مرور الزمن. إذا كان التمدد في يوم ما سيتوقف، فينبغي إذن أن يصبح بالفعل بطيئًا بمعدل واضح له دلالته. وإذا كان التمدد سيستمر للأبد، فإن معدل التباطؤ ينبغي أن يكون أقل كثيرًا.

كيف نصل لقياس مدى تغير معدل التمدد بمرور الزمن؟ إنه أمر سهل، من حيث المبدأ. ومرة ثانية، لأن الضوء يستغرق زمنا للانتقال مسافة شاسعة عبر الكون، فإننا نرى الأجسام الأكثر بعدًا كما كانت تبدو عليه عندما كان الكون أقل عمرًا. وعلى سبيل المثال، عندما ننظر للمجرات، داخل لنقل، ٢٠٠ مليون سنة ضوئية، فإنه يمكننا استخدام السرعات التي تتحرك بها بعيدًا عنا لنحدد ما كان عليه معدل التمدد أثناء الـ٢٠٠ مليون سنة الماضية. وإذا نظرنا بعدها إلى المجرات التي، لنقل إنها تبعد ٧ بلايين سنة، واستطعنا استخدام السرعات التي تبتعد بها عنا لنحدد ما كان عليه معدل التمدد منذ ٧ بلايين سنة، عندما كان الكون في نصف عمره الحالي فقط.

وقياس معدل التمدد بالنسبة للأوقات المختلفة في الماضي صعب جدًا من الناحية العملية (أساسًا لأنه من الصعب قياس المسافات بين المجرات بدقة كافية). ومع ذلك، بدءًا من التسعينيات، فإن تلسكوب هابل الفضائي ومراصد جديدة قوية أخرى قد وفرت للفلكيين إمكانية بدأ عمل هذه القياسات. وأعلنت النتائج لأول مرة في عام ١٩٩٨، وجاءت بمثابة صدمة كاملة تقريبًا لعلماء الفلك. وكانت الصدمة هي: كما ناقشنا للتو، أن الجميع تقريبًا يفترضون بطبيعة الحال أن الجاذبية ستبطئ التمدد، وكان التساؤل الوحيد ما إذا كان التباطؤ كثيرًا أم قليلا. ولكن الملاحظات أوضحت أن التمدد لن يتباطأ على الإطلاق. وبدلا من ذلك، فإن التمدد **يتسارع** مع مرور الزمن.

ليست غلطة بعد كل شيء

ما الذي يمكن احتماليًا أن يكون السبب في أن الكون يتسارع بدلا من أن يتباطأ مع مرور الوقت؟ في الحقيقة، لا يعرف أحد. وتأتي هذه الحقيقة أحيانًا بمثابة مفاجأة للناس الذين يتابعون أخبار الفلك، لأن معظم العلماء قد اتفقوا فعلا على اسم للإجابة: **الطاقة المظلمة** *dark energy*. ولذلك ستسمع العلماء يتكلمون عن "حقيقة" أن الطاقة المظلمة تسبب تسارع الكون، وربما حتى يناقشون بعض الخواص المفترضة للطاقة المظلمة، والتي تعني خصائص مستنتجة من الطريقة التي يتسارع بها التمدد. ولكن حيازة اسم لشيء ما لا يعني بالضرورة أننا نفهمه، وإذا كان هناك شيء وحيد أريدك أن تفهمه عن الطاقة المظلمة، فهو هذا: كل فكرة قد تكون سمعت بها أبدًا عن الطاقة المظلمة لا تزيد كثيرًا على تخمين، أو هي في أحسن الأحوال تكهنًا. لا يهم ممن جاءت الفكرة، أو مدى شهرة العالم أو العالمة. ففي الوقت الحاضر، نحن نفتقر إلى أي دليل قاطع حول طبيعة الطاقة المظلمة، وهو ما يعني ببساطة أننا لا نعرف ما هي عليه.

إن السعي لفهم الطاقة المظلمة هو واحد من أعظم المغامرات في العلم اليوم، ولكننا بسبب أهدافنا في هذا الكتاب حول النسبية فإننا سنركز فقط على قصة جانبية جديرة بالملاحظة. عندما نسأل إذا كانت معادلات النسبية العامة تتسق مع فكرة التمدد المتسارع، فإن الإجابة التي نجدها هي هذه: من الناحية الرياضية، النسبية العامة متوافقة مع التمدد المتسارع إذا أدرجنا عاملا يمكن أن يعادل الجاذبية الطبيعية. وبعبارة أخرى، أنها ستتوافق إذا أدرجنا ثابت أينشتاين الكوني، عامل التصحيح الذي أطلق عليه اسم "غلطته الكبرى".

ويتبقى أن نرى ما إذا كان لهذه الحقيقة أي تأثير على الواقع. وبعد كل شيء، فمن الممكن أيضًا ومثلما نعرف تمامًا أن النسبية ونظرية الكم تقدمان إجابات مختلفة عن تفرد الثقب الأسود، وإن النسبية قد لا تعطي بالضرورة إجابة صحيحة لكل هندسة الكون. أي أنه، في حين أن النسبية العامة قد اجتازت العديد من التجارب الدقيقة على صلاحيتها على مناطق موضعية للكون، وفي بعض الحالات على مساحات واسعة جدًا من الكون، فإننا لا نستطيع إلى الآن أن نكون متأكدين أنها القصة الكاملة للكون ككل. وما زال من الممتع أن نتأمل في فكرة أن أينشتاين قد أثبت أنه كان متقدمًا على عصره، حتى فيما اعتبره أسوأ لحظاته العلمية.

مصير الكون

وبغض النظر عن سببه، فإن التسارع الملحوظ للتمدد له نتائجه على المصير النهائي للكون. تذكر أنه قبل اكتشاف التسارع، بدا أن هناك مصيرين ممكنين للكون: الانتهاء بانهيار كبير أو تباطؤ تدريجي ولكن غير منته أبدًا للتمدد. وبافتراض أن الملاحظات المستقبلية ستستمر في تأييد حالة التمدد المتسارع، فإننا ينبغي الآن أن نقدم إمكانية ثالثة: أن التمدد سيستمر في التسارع. وقد لمح بعض العلماء أن التمدد المتسارع ربما يدفع في نهاية المطاف، معدل التمدد عاليًا جدًا

لدرجة أن الكون في يوم ما سيمزق نفسه إلى أشلاء فيما قد أطلق عليه "التمزق الكبير"، وذلك على الرغم من أن هذه الفكرة مثيرة للجدل في أحسن الأحوال.

ويبدو أن النتيجة الأكثر مباشرة للتمدد المتسارع هي أنه لن يتوقف وينعكس أبدًا، أي أن تمدد الكون سوف يستمر إلى الأبد. وفي الواقع، فإن فكرة أن تسارع التمدد تبدو واضحة جدًا منطقيًا، وتتضمن استمرار تمدده الدائم لدرجة أن الكثير يأخذونها كأحد المعطيات المسلم بها. ومع ذلك، كما قد أكدت خلال هذا الكتاب، أن المنطق ليس كافيًا في العلم. وحتى نفهم فعليًا ما يسبب التسارع – أي أن نكون قادرين على إجراء الملاحظات أو الاختبارات التجريبية التي تتحقق من فرضيته السببية– فإنه لن يمكننا أن نكون على ثقة بأن منطقنا صحيح.

وحتى لو أننا اكتشفنا مصدر الطاقة المظلمة الغامضة التي تدفع التسارع، وحتى لو كان هذا الاكتشاف يؤيد منطق التمدد الدائم، فما زالت هناك ملحوظة مهمة. وهي، أن الامتداد المنطقي لتأثير التسارع اليوم على مصير الكون في غده من الممكن ألا يكون صالحًا أكثر من أفضل معارفنا العلمية الراهنة. وفي القضية الخاصة بمصير الكون، تذكر أن مجرد فكرة التسارع جاءت بمثابة مفاجأة كبيرة للعلماء عندما اكتشفت منذ أقل من عقدين من الزمان. وكل ما نحتاجه لتغيير وجهة نظرنا عن مصير الكون مرة أخرى هو اكتشاف مدهش آخر مساو، وذلك الاكتشاف يمكن من حيث المبدأ أن يتم في أي وقت من الآن وحتى نهاية الزمان.

إرث أينشتاين

بدأنا هذا الكتاب برحلة تخيلية إلى الثقب الأسود. وسعينا إلى أن نفهم ما اختبرناه في تلك الرحلة قد قادنا عبر مقدمة لنظريتي أينشتاين الخاصة والعامة للنسبية، التي بدورها قادتنا إلى التأمل في تاريخ الكون من بدايته إلى نهايته

المحتملة. وباستثناء ما إذا كنت تعرف بالفعل شيئًا ما عن هذا الموضوع، فأظن أنك قد كنت مندهشًا جدًا من معرفة هذه الصلات بين نسبية الحركة والطابع العام للمكان والزمان والكون.

وعادة ما يتم مناقشة إرث أينشتاين من حيث اكتشافاته، وليس هناك شك في أنه أحدث ثورة في الفيزياء وفي فهمنا للكون. لقد علمنا أن المكان والزمان مرتبطان ارتباطًا لا ينفصم. وأعطانا طريقة جديدة لفهم الجاذبية، وتستخدم نظرياته اليوم لفهم موضوعات تتراوح من الأجسام الغريبة مثل الثقوب السوداء إلى هندسة الكون الكلية.

وبالنسبة لي، مع ذلك، فإن أعظم إرث له يأتي من الطريقة التي أظهرت القوة التي لا تصدق للتفكير العلمي. وعندما كان مراهقًا، بدأ أينشتاين يتساءل عما سيبدو عليه العالم إذا أمكنه الركوب على شعاع ضوء. ولكنه لم يتوقف عند هذا الحد. وبدلا من ذلك، أخذ زمام المبادرة لتعلم الرياضيات والفيزياء على مستوى عميق يكفي للبحث في الموضوع من الناحية الكمية، واستكشاف الطرق المختلفة التي يقوده إليها الفكر. وهذا هو جوهر العلم، وآمل أن إنجازات أينشتاين ستحث الكثير من الناس إلى إدراك قيمة العلم وإتاحة السبل أمامه ليعمل على مساعدتنا لكي نفهم العالم ونجعله مكانًا أفضل لنا جميعًا.

خاتمة

بصمتك التي يتعذر محوها عن الكون

بدأت هذا الكتاب بادعاء (في المقدمة) بأن النسبية **مهمة** لفهم الكيفية التي ننسجم بها كبشر مع الخطة الشاملة للكون. والآن، وقد أكملنا مقدمتنا لنظريات أينشتاين، فإن الوقت يبدو مناسبًا لننظر إلى الوراء وتفكر بعمق أكثر حول ذلك الادعاء. وبالطبع، فإن مختلف الناس قد يصلوا إلى استنتاجات مختلفة حول ما يجعل النسبية مهمة بالضبط، وأنا أشجعك على أن تأتي بأفكارك. وبالنسبة لنفسي فإنني، على أية حال، أجد النسبية مهمة على الأقل في أربعة مستويات.

المستوى الأول هو العلم المجرد. وعلى مدى أكثر من ١٠٠ عامًا منذ أن قدم أينشتاين النسبية لأول مرة للعالم، فإن كلا من نظريتيه النسبية الخاصة والعامة قد تم اختبارهما على نطاق واسع وبشكل متكرر. واليوم لا يمكن أن يوجد شك حول صحتيهما، على الأقل داخل المجالات التي قد اختبرتا فيها، ولذلك لا يمكننا أن نفهم الطبيعة دون أن نفهم النسبية أولا. وباستعراض مجرد أمثلة قليلة: فإننا لا نستطيع أن نفهم كيف تلمع النجوم دون أن نفهم أولا أن $E = mc^2$؛ ولا نستطيع أن نفهم ما الثقب الأسود حتى نفهم أولا أن الجاذبية تنبثق من انحناء الزمكان؛ ولا نستطيع أن نفهم كيف يمكن للكون أن يتمدد دون التمدد "داخل" شيء ما، إذا لم نفهم أولا الهندسة المحتملة الرباعية الأبعاد لهندسة الزمكان ككل؛ ولن تعمل وحدات نظام التوجيه العالمي *GPS* دون حسابات النسبية. وفي الواقع، فإن النسبية الآن هي جزء لا يتجزأ من فهمنا الشامل للكون مثلها مثل أن الأرض كوكب يدور حول الشمس، أو أن الجاذبية تجعل الأجسام تسقط إلى الأرض.

والمستوى الثاني الذي أجد فيه النسبية مهمة هو إدراكنا للحقيقة. تجعلنا تجاربنا المشتركة نكبر مع افتراض أن المكان والزمان منفصلان ومتميزان، ولكن النسبية أظهرت لنا خلاف ذلك. وكما قال زميل أينشتاين هيرمان مينكوفسكي في عام ١٩٠٨، "من الآن فصاعدًا، فإن المكان في حد ذاته، والزمان في حد ذاته، محكوم عليهما بالتلاشي إلى مجرد ظلال، ونوع من الاتحاد بين الاثنين هو فقط الذي سيصون الحقيقة المستقلة". وعلاوة على ذلك، تغير النسبية العامة إدراكنا للجاذبية، وتحوله من تأثير لا معقول عن بعد لنيوتن إلى كونه نتيجة طبيعية لهندسة الزمكان الذي ينحني بتأثير الكتل الموجودة في داخله. هذه التغيرات في الإدراك ربما لا يكون لها تأثير على الطريقة التي نمضي بها في حياتنا اليومية، ولكنها بالتأكيد ينبغي أن تغير الطريقة التي نفهم ونفسر بها الكون من حولنا.

والمستوى الثالث من الأهمية يقع في اعتقادي بأن اكتشاف أينشتاين للنسبية يشي بإمكاناتنا كجنس بشري. فقد يبدو علم النسبية منفصلا عن معظم المساعي الإنسانية الأخرى، ولكني أعتقد أن أينشتاين نفسه أثبت خلاف ذلك. طوال حياته، دافع أينشتاين ببلاغة عن حقوق الإنسان، وكرامته، وعن عالم يسوده السلام والرخاء المشترك. وكان إيمانه الراسخ بالخير الكامن في البشر ملفتًا للنظر، عندما نفكر أنه عاش خلال حربين عالميتين، وأنه طرد من ألمانيا قبل صعود النازيين، وأنه شهد المحرقة التي قضت على أكثر من ستة ملايين من إخوانه اليهود، وأنه رأى اكتشافاته الخاصة يتم استخدامها في عمل قنابل ذرية. ولا يمكن لأحد أن يقول على وجه اليقين كيف أنه حافظ على تفاؤله في مواجهة مثل هذه المآسي. ولكني أراه درسًا في النسبية. وكما قد رأيت، فإن أفكار النسبية تبدو بشكل لافت للنظر مخالفة للإدراك العام المشترك الذي نشأنا عليه، لدرجة أنه من الصعب في البداية أن تعتقد بها. وفي الواقع، فإنني أتوقع أنه في كثير من تاريخ البشرية، ظلت

النسبية بعيدة عن متناول اليد، لمجرد أنها بدت صعبة جدًا. ونحن نعيش الآن في زمن، نشكر فيه النهج الذي نسميها **العلم**، حيث تعتبر الأدلة الآن أكثر أهمية من التصورات المسبقة. لقد وصلنا لقبول النسبية لأن الأدلة التي تؤيدها قوية جدًا، على الرغم من أنها قد أجبرتنا على إعادة تعريف تصورنا للواقع. وبالنسبة لي، فإن هذا الاستعداد لإصدار الأحكام استنادًا إلى الأدلة يوضح أننا نرتقي كجنس بشري. ونحن لم نصل بعد إلى نقطة يظهر فيها هذا الاستعداد بصورة دائمة في جميع مساعينا الأخرى – وإذا وصلنا إليها، فلن يكون هناك المزيد من الظلم أو الفساد في العالم– ولكن حقيقة أننا قمنا بذلك في العلم توحي بأننا نحوز هذه الإمكانية.

وأخيرًا، أجد النسبية مهمة على مستوى رابع وأكثر تفلسفًا. قبل حوالي شهر من وفاته فقط في عام ١٩٥٥، كتب أينشتاين: "الموت لا يعني شيئًا... التمييز بين الماضي والحاضر والمستقبل هو مجرد وهم مستمر بعناد". وكما يوحي هذا الاستشهاد، فإن النسبية تثير كل أنواع الأسئلة المثيرة للاهتمام حول ما يعنيه حقًا مرور الوقت. ولأن هذه الأسئلة فلسفية، فليس لها إجابات قاطعة، وسيكون عليك أن تقرر ما تعنيه هذه الأسئلة بالنسبة لك. ولكني أعتقد أن شيئًا واحدًا واضحًا: استنادًا إلى فهمنا للزمكان، فإنه لا يمكن الالتفاف حول فكرة أن الأحداث في الزمكان لها صفة الدوام لدرجة أنك لا تستطيع أن تنزعها عنه. وبمجرد وقوع حدث، فإنه في جوهره يصبح جزءًا من نسيج كوننا. وحياتك عبارة عن سلسلة من الأحداث. وهذا يعني أنك عندما تقوم بوضعها جميعًا معًا فإنك تضع بصمتك الخاصة التي يتعذر محوها عن الكون. وربما إذا استطاع الجميع فهم ذلك، فقد نصبح أكثر اهتمامًا بأن نكون فخورين بالبصمة التي سنتركها.

دليل المصطلحات

Hawking radiation	إشعاع هوكينج
frame of reference	إطار مرجعي
free-float frames	أطر عائمة حرة
event horizon	أفق الحدث
gravitational waves	أمواج الجاذبية
spacetime curvature	انحناء الزمكان
nuclear fusion	اندماج نووي
gravitational redshift	الانزياح نحو اللون الأحمر للجاذبية
Big Bang	الانفجار الكبير
action at a distance	تأثير عن بعد
acceleration	تسارع
Entanglement	تشابك
singularity	تفرد
mass-energy equivalence	تكافؤ الكتلة والطاقة
time dilation	تمدد الزمن

expansion of universe	تمدد الكون
cosmological constant	الثابت الكوني
black hole	ثقب أسود
wormhole	ثقب دودي
white dwarf limit	الحد القزمي الأبيض (حد تشاندراسيخار)
Worldline	خط العالم
spectral lines	خطوط طيفية
cosmic microwave background	خلفية ميكروموجية كونية
spacetime	الزمكان
planetary nebula	سديم كوكبي
light-year	سنة ضوئية
absolute zero	الصفر المطلق
electron degeneracy pressure	ضغط التحلل الإلكتروني
neutron degeneracy pressure	ضغط التحلل النيوتروني
kinetic energy	طاقة حركية
rest energy	طاقة سكونية
dark energy	طاقة مظلمة

gravitational lensing	عدسية الجاذبية
Newton's universal law of gravitation	القانون العام للجاذبية لنيوتن
Newton's second law	قانون نيوتن الثاني
tidal force	قوى المد والجزر
dark matter	مادة مظلمة
exclusion principle	مبدأ الاستبعاد
equivalence principle	مبدأ التكافؤ
uncertainty principle	مبدأ عدم اليقين
Andromeda galaxy	مجرة أندروميدا
Milky Way Galaxy	مجرة درب التبانة
warp drive	محرك الاعوجاج
spacetime diagram	مخطط زمكاني
orbit	مدار
particle accelerators	معجلات الجسيمات
twin paradox	مفارقة التوأمين
hyperspace	مكان فوق الأبعاد
quantum mechanics	ميكانيكا الكم

white dwarf star	نجم قزمي أبيض
supernova	نجم متفجر أعظم
pulsar star	نجم نابض
neutron star	نجم نيوتروني
relativity of simultaneity	نسبية التزامن
Schwarzschild radius	نصف قطر شفارتزشيلد
global positioning system	نظام التوجيه العالمي

المؤلف فى سطور:

جيفري بينيت

جيفري بينيت حاصل على درجة بكالوريوس فـي الفيزيـاء مـن جامعـة كاليفورنيا في سان دييجو، وماجستير ودكتوراه في الفيزياء الفلكيـة مـن جامعـة كولورادو في بولدر. وهو متخصص في تعليم الرياضيات والعلوم، وقام بالتـدريس على نطاق واسع على جميع المستويات، ويتضمن ذلك أنه أسـس وأدار مدرسـة علمية صيفية خاصة لتعليم تلاميذ المدارس الابتدائية والمتوسطة. وعلـى مـستوى الكليات قام بالتدريس لأكثر من خمسين فصلا دراسيًا في علـوم الفلـك والفيزيـاء والرياضيات والتعليم. وهو مؤلف لأكثر الكتب الجامعية مبيعًا فـي أربعـة مجـالات مختلفة: الفضاء والرياضيات والإحصاء والأستروبيولوجي (الحياة في الكـون)، وقـد باعت هذه الكتب الجامعية أكثر من مليون نسخة. ومن مؤلفاته للجمهور:

On the Cosmic Horizon (Addison Wesley, 2001); Beyond UFOs (Princeton University Press, 2008/2011), Math for Life (Updated Edition from Big Kid Science, 2014), What is Relativity? (Columbia University Press, 2014); and On Teaching Science (Big Kid Science, 2014).

المترجم فى سطور:

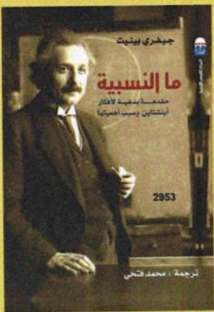
محمد فتحي محمود

طبيب بشري بالمعاش.. شاعر ومترجم.

من أعماله في الترجمة: **كيف تعيش يومك؟** أرنولد بنّيت، مكتبة مدبولي ٢٠٠٤، **بيزنس حقوق الإنسان**، آورورا فيوكوليسكو وهيلين ياناكوبولوس، المركز القومي للترجمة.

التصحيح اللغوى: وجيه فاروق

الاشراف الفنى: حسن كامل



لا يزال هذا الكتاب الذي ألفه صاحب النظرية النسبية ألبرت أينشتين، ونشر عام 1916م، وأُعيد طبعه بلغته الإنجليزية خمس عشرة مرة على الأقل، وترجم منذ نحو 40 عامًا من أفضل الكتب البسيطة عن النظرية النسبية الخاصة والعامة، وسبب ذلك أن صاحب النظرية يقدم فيه أسسها في سهولة ويسر، ويتغلب في براعة فائقة على تردد المتطبعين بالفيزياء الكلاسيكية في الانفلات من الهندسة الإقليدية وما يصاحب ذلك من عدم القبول بالجديد.

طورت نتائج النظرية النسبية وتطبيقاتها المعرفة العلمية، وأوصلت إلى غزو الفضاء وفك الكثير من أسراره، كما ساعدت على دراسة وتطوير نظرية الجسيمات الأولية والكثير من موضوعات الفيزياء الحديثة، كما أن التنبؤات التي طرحتها النظرية النسبية في الثلاثينيات والأربعينيات من القرن الماضي قد تحققت عن طريق العالمين أوبنهايمر وجورج جامو، وتم الكشف عن ذلك في النصف الثاني من القرن العشرين.

تصميم الغلاف: عبد العزيز السماحي